

공학박사 학위논문

실해역 모형시험기법을 이용한 소형  
고속 활주형선의 선형개발에 관한 연구

*A Study on the Hull-form Development of the Small High-speed  
Planing Craft using At-sea Model Test Techniques*

지도교수 조 효 제

2008년 2월

한국해양대학교 대학원  
조선해양시스템공학과

박 충 환

# 목 차

Abstract .....	iv
List of Figures .....	vi
List of Tables .....	xi
Nomenclature .....	xii
제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구목적 및 배경 .....	1
1.2 관련 연구개발 현황 .....	2
1.3 연구내용 및 범위 .....	4
제 2 장 고속 활주형선 선형특성 .....	6
2.1 고속정의 분류 .....	6
2.2 활주형선 선형특성 .....	9
2.2.1 활주형선 유체역학적인 특징 .....	9
2.2.2 활주형선 저항 .....	15
2.2.3 활주형선 유체력 계산 .....	17
2.3 활주형선 설계 .....	24
2.3.1 활주형선 핵심요소 .....	24
2.3.2 활주형선 선형설계 .....	28
제 3 장 고속 활주형선 선형개발 .....	33
3.1 고속 stepped planing hull 레저보트 .....	33
3.1.1 Stepped planing hull 선형특성 .....	33

3.1.2 선형 개념정립	35
3.1.3 선형설계	37
3.2 횡동요 감소 stepped planing hull 레저보트	40
3.2.1 횡동요 감소 stepped hull 선형특성	41
3.2.2 선형 개념정립	43
3.2.3 선형설계	45
3.3 마찰저항 감소 선저공기공급 레저보트	47
3.3.1 선저 공기공급선 선형특성	48
3.3.2 선형 개념정립	49
3.3.3 선형설계	51
 제 4 장 실패역 모형시험기법 정립	 53
4.1 고속 활주형선의 모형시험법 특징	54
4.2 실패역 모형시험법	55
4.2.1 실패역 모형시험기법 정립	55
4.2.2 시험시스템 및 계측장비	56
4.2.3 저항시험결과 검증	60
4.2.4 시험방법	64
4.2.5 시험 해석방법	66
 제 5 장 고속 활주형선 선형시험 및 검증	 68
5.1 선저 Step개수에 따른 활주형선 저항특성 비교	68
5.1.1 대상모형	68
5.1.2 시험방법 및 결과 고찰	70
5.1.3 실선 속력시운전 성능평가	80
5.2 선미 보조동체 활주형선 운동특성 및 저항특성 비교	82

5.2.1 대상모형	82
5.2.2 시험결과 고찰	84
5.2.3 실선 시운전 성능평가	95
5.3 선저 공기공급 활주형선의 저항특성 비교	98
5.3.1 대상모형	98
5.3.2 시험결과 고찰	100
5.3.3 실선 속력시운전 성능평가	107
제 6 장 결 론	108
참고문헌	110

# A Study on the Hull-form Development of the Small High-speed Planing Craft using At-sea Model Test Techniques

Chung-Hwan Park

Department of Naval Architecture and  
Ocean Systems Engineering, Graduate School,  
Korea Maritime University

## Abstract

Interests in high speed cargo ship are increasing with the growing importance of world trade. In addition, high speed ship has tendency to increase the utility value in various special purpose ships such as patrol boat, leisure boat, etc. The category of high speed ship includes planing craft, hydrofoil, ACV, SES & etc. Hydrodynamic or aerostatic support types are mainly used for small sized naval vessel, passenger boat, utility boat, leisure boat, and others, due to the limitation of seaworthiness and enlargement. The planing craft is designed specifically to achieve comparatively high speed on the surface of the water. Especially, planing craft is so popular as holding 80% of the research for high speed boat.

On the one hand, the performance verification equipments of crafts are the circulating water channel and towing tank. But model-test

of the high speed planing craft has a difficulty in performance verification because of the relatively small scale ratio of the ship-model and restricted by flow velocity of the circulating water channel and X-carriage velocity of the towing tank.

In this paper, I will describe the hydrodynamic characteristics of planing hull, discussing the effect on planing performance. In order to verify performance of high speed planing craft, at-sea model test techniques were used. Also, the hull form development and resistance performance of small high speed planing craft were studied with experiments of using at-sea model test techniques. This process explains the process of hull form development for principal performance for 3 high speed planing crafts, which are gathering great interests lately. To verify the proposed model test method, resistance measuring or load cell used calibration and it showed  $\pm 2.5\%$  error in comparison to circulating water channel resistance result for 5m class rescue boat.

In general, the stepped hull craft has high fuel efficiency thanks to the resistance reduction by a small wetted surface area without corresponding stepped hull craft. But It has a tendency to show bad rolling performance by reduced wetted area in stern. The model tests for 3 planing crafts which the number of step and with & without attached a stern body and with & without air injection in bottom were performed to compare the effect of principal performance using at-sea model test techniques.

In conclusion, this step and air injection in bottom are effective in reducing in wetted surface area of a ship. It was invested that almost 5~10% of the total resistance of model ships at designed speed can be reduced. And the planing craft attached a stern planing body was invested effective to reducing roll angle and pitch angle.

## List of Figures

Fig. 2.1	Classification of high-speed vessels .....	6
Fig. 2.2	Distribution of high-speed planing hull on Savitsky' diagram .....	7
Fig. 2.3	Hydrofoil crafts .....	8
Fig. 2.4	Resistance curve of high-speed craft .....	10
Fig. 2.5	Curve of trim .....	10
Fig. 2.6	Wedge-shape model .....	11
Fig. 2.7	Drag to lift ratio of wedge shape model .....	14
Fig. 2.8	V-shape model (Schematic) .....	14
Fig. 2.9	Pressure distribution of planing surface .....	18
Fig. 2.10	Force distribution of planing surface .....	18
Fig. 2.11	Length to beam ratio of wetted area .....	19
Fig. 2.12	Force distribution of planing surface with deadrise ..	20
Fig. 2.13	L/B ratio of trim and deadrise .....	21
Fig. 2.14	Force distribution of planing craft .....	21
Fig. 2.15	Gravity and buoyancy of planing craft .....	26
Fig. 2.16	Wetted surface of planing craft at 25kt & 40kt ....	27
Fig. 2.17	Bow shape for a high-speed craft with a cutaway forefoot .....	29
Fig. 2.18	Body plan of planing craft .....	30
Fig. 2.19	The boat's changing attitude by spray rail .....	31
Fig. 2.20	Various chine configurations in the midsection ....	32
Fig. 3.1	Wetted area of stepped hull by air injection .....	34
Fig. 3.2	Body plan of stepped hull .....	38

Fig. 3.3	Lines of non-step hull .....	38
Fig. 3.4	Lines of single-step hull .....	39
Fig. 3.5	Lines of twin-step hull .....	39
Fig. 3.6	Wetted area of stepped hull .....	40
Fig. 3.7	Wetted area of stepped hull with stern planing body ..	40
Fig. 3.8	Body plan of M-hull's main body .....	41
Fig. 3.9	Body plan of M-hull's planing tunnel .....	42
Fig. 3.10	Body plan of M-hull's rigid skirts .....	42
Fig. 3.11	Schematic of the stern planing body .....	45
Fig. 3.12	Body plan of stepped hull with stern body .....	46
Fig. 3.13	Lines of stepped hull with stern body .....	46
Fig. 3.14	Body plan of stepped hull without stern body .....	47
Fig. 3.15	Lines of stepped hull without stern body .....	47
Fig. 3.16	Schematic diagram of air cavity and air bubble ....	48
Fig. 3.17	Fluid flow of the hull bottom .....	49
Fig. 3.18	Bottom of the hull without air injection .....	50
Fig. 3.19	Bottom of the hull with air injection .....	50
Fig. 3.20	Lines of the hull without air injection .....	52
Fig. 3.21	Lines of the hull with air injection .....	52
Fig. 4.1	Schematics of towing system (2 models) .....	57
Fig. 4.2	Schematics of towing system (1 model) .....	57
Fig. 4.3	Arrangement of towing system (1 model) .....	58
Fig. 4.4	A profile figure of support guide (1 model) .....	58
Fig. 4.5	Composition of data acquisition system .....	59
Fig. 4.6	Comparison of resistance result .....	61
Fig. 4.7	Calibration formula of load cell (50N) .....	63



Fig. 4.8	Input signal of voltage at each weight (0–6kg) ····	63
Fig. 4.10	General arrangement of at-sea model test ······	65
Fig. 5.1	Body plan of stepped hull ···········	68
Fig. 5.2	Model shape of the stepped hull ··········	69
Fig. 5.3	Comparison of sinkage and trim for model ships ···	71
Fig. 5.4	Comparison of Cts for ships (C.W.C) ········	71
Fig. 5.5	Comparison of EHP for ships (C.W.C) ········	71
Fig. 5.6	Wave patterns of non-step hull at the front & stern (Fn:0.659) ···········	72
Fig. 5.7	Wave patterns of single-step hull at the front & stern (Fn:0.652) ···········	72
Fig. 5.8	Wave patterns of twin-step hull at the front & stern (Fn:0.653) ···········	72
Fig. 5.9	Wave pattern of non-step hull at the profile (Fn:0.659) ···········	73
Fig. 5.10	Wave pattern of single-step hull at the profile (Fn:0.652) ···········	73
Fig. 5.11	Wave pattern of twin-step hull at the profile (Fn: 0.653) ···········	73
Fig. 5.12	Comparison of Cts for ships ···········	74
Fig. 5.13	Comparison of EHP for ships ···········	74
Fig. 5.14	Comparison of Rtm for model ships (Fn▽) ······	75
Fig. 5.15	Comparison of Cts for ships (Fn▽) ··········	75
Fig. 5.16	Comparison of Cts for ships (ship speed) ······	76
Fig. 5.17	Comparison of EHP for model ships ··········	76
Fig. 5.18	Experimental feature of non-step hull (Fn▽: 5.526, 6.146, 7.050) ···········	77

Fig. 5.19	Experimental feature of single-step hull ( $F_n \nabla$ :5.372, 6.273, 7.184) .....	78
Fig. 5.20	Experimental feature of twin-step hull ( $F_n \nabla$ :5.421, 6.326, 6.954) .....	79
Fig. 5.21	Curve of power and rpm of twin-step hull .....	80
Fig. 5.22	Feature of twin-step hull .....	81
Fig. 5.23	Speed trial of twin-step hull .....	81
Fig. 5.24	Body plan of planing craft without stern planing body	83
Fig. 5.25	Body plan of planing craft with stern planing body	83
Fig. 5.26	Model shape of the planing craft .....	84
Fig. 5.27	Comparison of $R_{tm}$ for model ships .....	86
Fig. 5.28	Comparison of $C_{ts}$ for ships( $F_n \nabla$ ) .....	86
Fig. 5.29	Comparison of $C_{ts}$ for ships (ship speed) .....	87
Fig. 5.30	Comparison of EHP for ships .....	87
Fig. 5.31	Comparison of roll angle( $^{\circ}$ ) ( $V \doteq 21$ knot) .....	88
Fig. 5.32	Comparison of roll angle( $^{\circ}$ ) ( $V \doteq 31$ knot) .....	88
Fig. 5.33	Comparison of roll angle( $^{\circ}$ ) ( $V \doteq 40$ knot) .....	89
Fig. 5.34	Comparison of roll angle( $^{\circ}$ ) ( $V \doteq 45$ knot) .....	89
Fig. 5.35	Comparison of roll angle( $^{\circ}$ ) ( $V \doteq 52$ knot) .....	90
Fig. 5.36	Comparison of pitch angle( $^{\circ}$ ) ( $V \doteq 21$ knot) .....	90
Fig. 5.37	Comparison of pitch angle( $^{\circ}$ ) ( $V \doteq 31$ knot) .....	91
Fig. 5.38	Comparison of pitch angle( $^{\circ}$ ) ( $V \doteq 40$ knot) .....	91
Fig. 5.39	Comparison of pitch angle( $^{\circ}$ ) ( $V \doteq 45$ knot) .....	92
Fig. 5.40	Comparison of pitch angle( $^{\circ}$ ) ( $V \doteq 52$ knot) .....	92
Fig. 5.41	Experimental feature of planing craft without stern planing body .....	93

Fig. 5.42	Experimental feature of planing craft with stern planing body .....	94
Fig. 5.43	Curve of power and rpm of stepped hull with stern body .....	95
Fig. 5.44	Curve of roll angle( $^{\circ}$ ) ( $V \approx 51$ knot) .....	96
Fig. 5.45	Curve of pitch angle( $^{\circ}$ ) ( $V \approx 51$ knot) .....	96
Fig. 5.46	Feature of planing craft with stern planing body ...	97
Fig. 5.47	Speed trial of planing craft with stern planing body	97
Fig. 5.48	Body plan of planing craft without air injection ...	99
Fig. 5.49	Body plan of planing craft with air injection .....	99
Fig. 5.50	Model shape of the planing craft .....	100
Fig. 5.51	Comparison of $RT_m$ for model ships .....	101
Fig. 5.52	Comparison of $C_t$ s for ships .....	101
Fig. 5.53	Comparison of EHP for ships .....	102
Fig. 5.54	Experimental feature of planing craft without air injection I .....	103
Fig. 5.55	Experimental feature of planing craft without air injection II .....	104
Fig. 5.56	Experimental feature of planing craft with air injection I .....	105
Fig. 5.57	Experimental feature of planing craft with air injection II .....	106
Fig. 5.58	Speed trial of planing craft with air injection .....	107

## List of Tables

Table 3.1	Principal particular of stepped hull .....	37
Table 3.2	Principal particular of stepped hull with stern body ..	44
Table 3.3	Principal particular of planing hull with air injection ..	51
Table 4.1	Measuring equipment of at-sea model test .....	59
Table 4.2	Principal particular of ship and model .....	61
Table 4.3	Calibration result of load cell (50N) .....	62
Table 5.1	Principal particulars of ship and model .....	69
Table 5.2	Speed trial result of twin-step hull .....	80
Table 5.3	Principal particulars of ship and model .....	82
Table 5.4	Speed trial result of planing craft with stern planing body .....	95
Table 5.5	Principal particulars of ship and model .....	98
Table 5.6	Principal particulars of ship .....	107

# Nomenclature

$A_{VT}$	Transverse projected area
$b$	Beam of planing surface
$B$	Breadth, molded, m
$C_A$	Model–ship correlation allowance
$C_{AA}$	Air resistance coefficient
$C_B$	Block coefficient
$C_D$	Drag coefficient
$C_f$	$C_f = D_f \cos \beta / \frac{1}{2} \rho V_1^2 \lambda b^2$
$C_L$	Lift coefficient
$C_{L0}$	Lifting Coefficient, $\frac{\Delta}{0.5 \times \rho \times V^2 \times b^2}$
$C_{Ld}$	Dynamic component of lift coefficient
$C_{Lb}$	Buoyant component of lift coefficient
$C_{Fr}$	Rudder resistance coefficient
$C_{FM}$	Frictional resistance coefficient of model
$C_{FS}$	Frictional resistance coefficient of ship
$C_P$	Distance of center of pressure(hydrodynamic force) measured along keel forward of transom, $l_p/\lambda b$
$C_{L\beta}$	Lifting coefficient of deadrise
$C_N$	Vertical pressure coefficient
$C_R$	Residuary resistance coefficient
$C_{TM}$	Total resistance coefficient of model
$C_{TS}$	Total resistance coefficient of ship
$C_v$	Speed coefficient, $V/\sqrt{g \times b}$
$C_w$	Wave–making resistance coefficient

$D$	Depth, molded, m
$D_f$	Frictional drag-force component along bottom surface
$EHP$	Effective horse-power(ps)
$f$	Distance between T and CG
$Fn$	Froude number
$Fn_{\nabla}$	Volume froude number
$g$	Acceleration due to gravity
$k_s$	Mean height of ship surface roughness
$L_w$	Wetted length
$L_{keel}$	Wetted length of Keel, m
$L_{chine}$	Wetted length of chine, m
$L_p$	Distance from transom to point of intersection of hydrodynamic-force vector with keel, m
$L.C.B$	Longitudinal center of buoyancy
$L.C.G$	Longitudinal center of gravity from transom
$L.W.L$	Load waterline
$N$	Vertical pressure acting on bottom
$P_B$	Brake power, ps
$P_D$	Delivered power, ps
$m$	Mass
$M_a$	Bow-up moment due to $R_a$
$M_f$	Bow-up moment due to $R_f$
$M_N$	Bow-up moment due to $N$
$w$	Specific weight of water, pcf (lb/ft <sup>3</sup> )
$R_a$	Added resistance acting on propeller
$R_e$	Reynolds number, $V_1 \lambda b / \nu$

$R_f$	Resistance acting on hull
$R_r$	Resistance due to rudder
$R_F$	Friction resistance
$R_{Fsh}$	Resistance due to propeller shaft
$R_R$	Residuary resistance
$R_{TM}$	Total resistance of model
$R_{TS}$	Total resistance of ship
$R_V$	Viscous resistance
$R_W$	Wave-making resistance
$S_M$	Wetted area of model
$S_S$	Wetted area of ship
$S_w$	Wetted area of planing boat involve spray plane
$t/c$	Thickness to chord length ratio
$T$	Thrust of propeller
$v$	Components of velocity
$V$	Horizontal velocity of planing surface, m/s
$V_1$	Mean velocity over bottom of planing surface
$V.C.G$	Distance of center of gravity above keel line
$V_s$	Ship speed
$W$	Weight, generally, kg
$WL$	Waterline

## Greek

$\tau$	Trim angle of planing area, ( $^{\circ}$ )
$\lambda$	Mean wetted length-beam ratio, $\frac{L_w}{b} = \frac{L_{keel} + L_{chine}}{2b}$

$\lambda_1$	Mean wetted length–beam ratio based on area below undisturbed water surface
$\beta$	Angle of deadrise of planing surface
$\Delta\lambda$	Increasing rate of beam to length ratio by spray
$\epsilon$	Inclination of thrust line relative to keel, deg
$\phi$	Roll angle, (° )
$\theta$	Pitch angle, (° )
$\psi$	Yaw angle, (° )
$\alpha$	Angle of attack on a control surface
$\rho$	Mass density of water = $w/g$
$\nabla$	Displacement Volume, m <sup>3</sup>



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구목적 및 배경

최근 세계적으로 경제교류가 활성화 되면서 고속선박에 대한 관심이 크게 증가되고 있다. 이러한 고속선은 대규모 화물수송 뿐만 아니라 고속 내항수송선으로부터 관공선, 레저선박 등 다양한 분야에서 그 활용도가 크게 증가하고 있는 추세이다. 고속선박에 관한 연구들이 향후 어떠한 기술개발을 유도하게 될 것인지를 정확하게 추정하는 것은 어려운 일이나, 기본적인 흐름을 이루는 공통점은 기존의 고속선보다 훨씬 Froude 수가 높은 고속선을 개발하는 기술일 것이다[1].

고속정에 관한 연구는 근년에 이르러서 시작된 것은 아니다. 고속정 선형으로 대표적인 반활주정(Pieson 1897), 수중익선(Napier 1888), 공기부양선(Dineason 1907) 등을 생각하여 보면 최초로 나타난 것은 아주 오래전이라 할 수 있다[2]. 고속화하는 선형으로는 동적방법에 의한 활주형선(planing craft)을 비롯하여 수중익선(hydrofoil boat)을 대표적인 예로 들 수 있다. 정적방법에 의하여 고속화하는 선형으로는 공기부양선(air cushion vehicle)을 대표적인 예로 들 수 있다. 전체 고속정의 80% 이상을 차지하는 활주형선의 유체역학적인 주요특징은 배수량형 선박과는 달리 선체와 수면사이에 커다란 동적압력에 의하여 그것이 선체를 부상시키게 됨에 따라 저항이 감소하게 되어 고속으로 항주하는 것이 가능하게 된다. 이때 작용하는 동적인 압력은 선체를 부상시키는 것만이 아니라 트림을 발생하게 하여 항주자세의 변화를 일으키게 하며 그 결과 저항성능에 커다란 영향을 주게 된다[3].

한편, 고속 활주형선과 같은 소형, 경량이며 고속으로 항주하는 선형의 성능 검토는 건조가격 등의 이유로부터 모형시험을 하는 것은 드물며, 대부분 실선 시운전 평가로 이루어지고 있다. 그러나 건조이전에 유체역학적 문제에 직면했을 때의 선형검증의 최적의 해결방법으로서는 모형시험이 필수적이나, 대부분의 국내외 회류수조 유속 및 예인전차의 속도제한과 수조 천수영향, 측벽효과 등의 여러 가지 문제가 작용하였기 때문에 국가별 시험수조에서는 고속 활주형선 선형개발을 위해 독자적인 실용적인 실험법을 개발하고 있는

실정이다[4]. 또한, 설계에서 감성이 중요시 되는 소형 고속 활주형선의 성능 연구에 실선 실험을 하여야 한다는 것은 무의미해 보이며, 객관적으로 성능을 평가할 수 있는 시험방법, 계측데이터의 취득과 해석 등의 새로운 평가방법 연구가 절실한 실정이다[5][6].

본 연구에서는  $Fn=4.0$  이상에서도 소형 고속 활주형선의 모형시험이 가능할 수 있는 실 해상모형시험법 이용하여 건조 이전 초기 설계단계에서 소형 고속 활주형선의 선저 스텝개수별, 선미 보조동체 장착, 선저 공기공급 유무 등의 선형개량에 따른 주요성능을 정성적으로 비교, 평가하였다.

## 1.2 관련 연구개발 현황

고속 활주형선의 모형시험은 배수량선형의 시험법과는 다른 점이 많기 때문에 ITTC에서는 별도의 위원회를 두고 세계선형시험수조의 지침서가 되는 보고서를 정례적으로 발간하고 있다. 고속 활주형선 시험의 문제점으로서 Froude 수가 크기 때문에 기존의 예인전차로서는 예인속도가 부족하여, 모형선을 작게 만들어야 하고 측벽이나 수조 깊이에 따르는 천수영향이 나타난다는 점이다. 그리고 일반적인 배수량 선형과는 달리 주행 중에 자세변화가 크게 나타나고 그 영향이 저항특성에 크게 영향을 주게 된다는 점, 그리고 자세의 변화에 따라서 침수표면의 형상이나 침수표면적이 크게 변화하게 되어 마찰저항을 추정하는 것도 곤란하다는 등의 다양한 문제점들이 지적되고 있다[7][8]. 달리 말하면 고속선의 모형시험의 특징은 일반 배수량형 선박과 비교해서 동적인 부력에 의하여 배의 중량이 받쳐지게 되기 때문에 항주속도에 따라 주행자세(트림, 부상량) 변화가 커서 침수면적의 변화도 크고, 배의 중심의 전후위치를 변형(트림 변경)하는 것에 의하여 항주자세의 변화는 선박의 성능과 밀접하게 관계하고 있다[9][10].

일본 선박기술연구소의 고속수조에서도 천수영향과 시험법과 관련된 여러 가지 문제 때문에 선체길이 20m이고 선속 49knot를 한계로 보고 있어 소규모 고속정은 실용적인 실험법을 개발하고 있는 실정이다[11]. Ikeda[12] 등은 모형선을 저항, 양력, 모멘트가 계측되는 3분력계에 완전히 고정시킨 자세구

속시험법을 제안하여 모형선에 작용하는 유체력의 계통적인 계측하고 유체력 데이터를 데이터베이스로 사용해서 항주중의 자세 및 저항을 구하는 프로그램을 개발하였지만, 배의 부상량의 변화에 따른 트림(trim)각도는 수없이 변화하기 때문에 이러한 상태를 모두 포함할 수 있는 방대한 수의 실험을 수행해야 한다는 단점을 가지고 있다. 이 방법은 예전 Savitsky[13]에 의해서 이루어졌으나, 자세를 계통적으로 바꾼 유체력의 계측실험이 필요하기 때문에 종래의 저항시험에 비하면 계측점의 수가 많아진다는 이유로 지금까지 실시되어 오지 않았다. Kawahara[11], Ohkusu[14]는 상하방향을 자유롭게 하고 트림만을 구속한 저항시험기를 만들어서 저항과 트림모멘트의 2분력과 부상량을 계측하는 방법을 제안하고 있다.

Katayama[5] 등은 고속 레저선박을 0.5m이하의 초소형 모형선으로 제작하여 고속 예인수조에서 완전 구속하여 유체력을 계측하는 저항시험법을 개발하였으며, 또한 Maruo[15], Hayashita [9] 등은 고속 레저선의 선체에 작용하는 유체력을 계측하고 이를 통해 선체를 힘과 모멘트 평형이 되는 자세로 변화를 시켜 저항계측을 하고 이러한 계측시험을 반복하여 실제 항주시 선체자세 및 저항 계측이 가능하다는 방법을 제안한 적이 있다. 또한, 국내에는 높은 속력을 낼 수 있는 외팔보 전차를 사용하여 선박을 고정하여 성능을 검증하는 서울대학교의 고정식 외팔보 형식의 예인수조가 있지만, 이러한 저항시험의 문제는 고속에서 활주를 하는 고속선의 가장 기본적인 유체역학적 특징인 트림과 침하량(sinkage)를 제한함으로써 고속 영역에서의 활주자세를 배제한다는 것이다.

한편, 고속 활주형선의 수조시험 결과로부터 실선의 성능을 예측하는 방법은 배수량형 선박과는 달리 확립이 되어 있지 않은 실정이며, 고속 활주형선의 선형조파저항 이론계산과 저항시험 결과 해석의 최대 문제점은 선속에 따른 고속정의 침수표면적을 어떻게 결정하는가 하는 문제이다[16].

본 논문에서는 지금까지의 유사연구에서는 볼 수 없었던 시험법 즉, 모형선의 실제 주행상태를 직접 실현하여 실선성능을 확인하는 실험역 모형시험 기법을 이용하여 소형 고속 활주형선의 선형개량에 따른 정성적인 성능을 비교, 평가하였다.

### 1.3 연구내용 및 범위

고속 활주형선의 선형개발에 있어서, 가장 중요한 사항은 선형설계와 성능 연구의 중요한 부분으로 모형시험법이라 생각된다. 고속 활주형선의 설계는 선택(choice), 절충(compromise), 그리고 균형(balance) 3가지의 중요한 요소들을 수반한다. 깊은 V형 단동선형에 국한시키더라도 설계자는 폭을 넓게 할 것인지 좁게 할 것인지, 차인을 낮게 또는 높게 할 것인지, 깊은 V형상을 적당하게 또는 극단적으로 할 것인지 등 세부사항까지도 선택해야 하며, 각각의 선택은 상반되는 사항들의 절충을 통해 설계자는 이러한 상반되는 요구들 사이에서 속도, 용도, 운항조건 등에 대한 최적의 설계를 위해서 균형을 찾아야 한다[17]. 또한, 고속 활주형선 수조시험은 Froude 수가 크고, 배수량 선형과는 달리 주행 중에 자세변화에 따른 저항특성과 침수표면적이 크게 변화하게 되는 등의 다양한 문제점들이 지적되어 실선성능을 예측하는 방법은 배수량형 선박과는 달리 확립이 되어 있지 않다[10].

본 논문에서는 고속 활주형선의 초기 설계단계에서 주요성능을 정성적으로 평가할 수 있는 모형시험기법의 하나로서 실험역 모형시험을 정립하였으며, 본 시험법을 이용하여 최근 고속화에 관심이 집중되고 있는 고속 활주형 레저보트 3척을 대상으로 선저 스텝개수별, 선미 보조동체 장착, 선저 공기공급 유무 등의 선저 선형개선에 따른 주요성능을 정성적으로 비교, 평가하였다.

제2장에서는 고속정의 분류, 활주형선의 저항요소와 유체력 계산 등의 유체역학적 특성을 기술하였고, 고속 활주형선의 최적 설계를 위한 기술적인 요소와 주요 선형설계시 고려해야할 주요 선형특징 등을 정리하였다.

제3장에서는 실 해상모형시험에 사용된 고속 스텝(step) 적용 선형, 선미 보조동체 장착 선형, 선저 공기공급 레저보트 3척의 선형특성과 선형 개념정립 및 선형설계 등의 선형개발 과정을 기술하였다.

제4장에서는 국내외 고속선 모형시험 현황과 고속 활주형선의 모형시험법 특징을 서술하였으며, 본 연구에서 이용된 실험역 모형시험의 시험시스템 구축과 계측장비를 소개하고, 시험결과 검증과 시험방법 등의 실험역 모형시험 기법에 대하여 상세하게 설명하였다.

제5장에서는 최근 고속화를 위한 선형개발로 관심이 집중되고 있는 선저스텝(step) 적용, 선미 보조동체 장착, 선저 공기공급에 따른 각 3척의 활주형 선 레저보트 선형을 대상으로 실험역 모형시험기법을 이용하여 횡·종동요 및 저항특성 등의 주요성능을 정성적으로 비교, 평가하였다.

제 6 장에서는 본 연구논문의 총체적인 연구결과에 대해서 기술하였다.

## 제 2 장 고속 활주형선 선형특성

고속 활주형선의 유체역학적인 주요특징은 동적인 양력을 들 수 있으며, 수면하의 선체형상이 항주중일 때 정지시와 현저하게 달라진다는 점을 들 수 있다. 본 장에서는 고속정의 분류, 활주형선의 유체역학적 특성 및 고속 활주형선의 설계를 위한 고려사항과 중요한 기술적인 부분에 대하여 서술하였다.

### 2.1 고속정의 분류

고속정 연구의 첫걸음은 분류법이라고 할 수 있다. 국제선형시험수조회의(ITTC)에서 사용하고 있는 고속정의 분류는 일반적으로 Fig. 2.1에 보는 바와 같이 구분되고 있다[16].

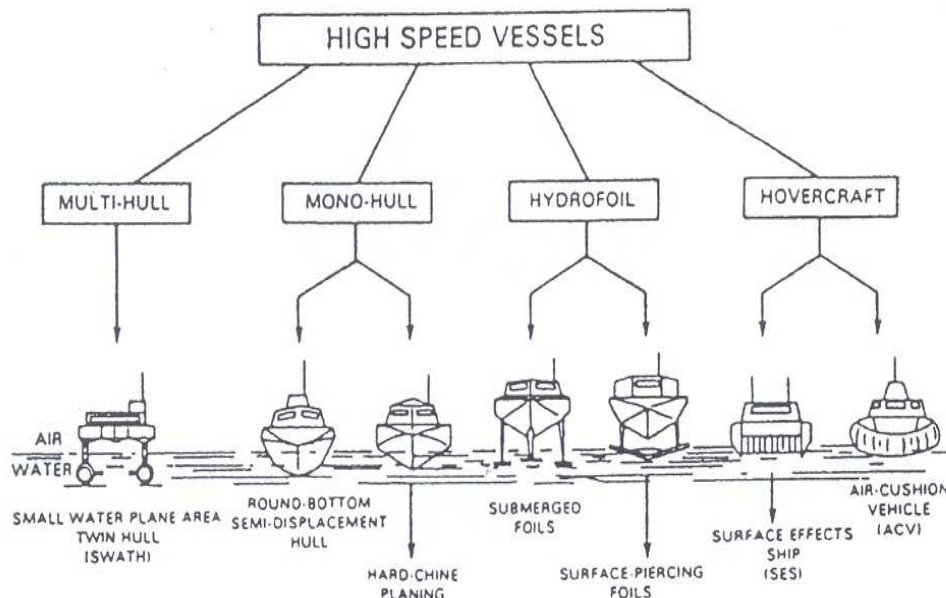


Fig. 2.1 Classification of High-speed vessels

#### (1) 단동선형(Mono-hull)

단동형선은 반 활주선형(semi-displacement hull)과 활주선형(planing hull)으로 나누어지는데, 반 활주형선이란 선저가 둥근(round bottom)선형이며 선

저에 발생하는 동압을 이용하여 선체를 부양하고 선체의 저항을 감소시킴으로서 고속을 얻는 선박이며, 활주형선은 선저가 각형(hard chine)이며 반 활주형선과 같이 선체를 부상시키는 원리는 같지만, 선체가 받는 양력이 배수량의 50% 이상을 차지하고, 선저 끝의 일부를 수면에 닿게 해서 활주하는 선박이다. Savitsky[13]는 Fig. 2.2와 같이 고속정의 크기와 선속과의 관계 분포도에서 배수량 선형에 적합한 속도영역을  $F_n < 0.39$ , 반 활주형 선형을  $0.39 < F_n < 0.89$  그리고 활주형 선형을  $F_n > 0.89$ 로 구분하고 있다.

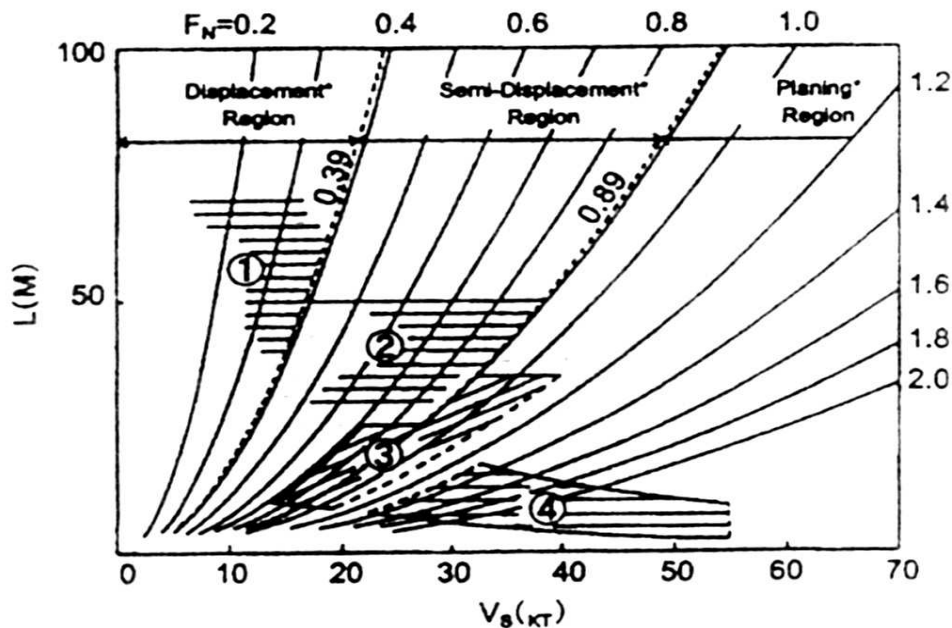
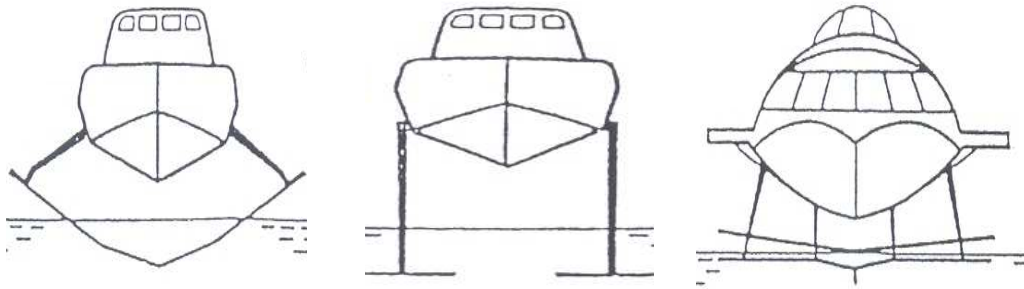


Fig. 2.2 Distribution of high-speed planing hull on Savitsky' Diagram

## (2) 수중익 고속정(Hydrofoil craft)

수중익선은 수중날개(hydrofoil)가 받는 유체동역학적 양력에 의해 선체중량이 지지되는 것으로서 Fig. 2.3에 보인 것과 같이 수중날개의 형상과 물속에 잠기는 정도에 따라 반잠수형 수중익선(surface piercing hydrofoil craft), 완전 잠수형 수중익선(submerged piercing hydrofoil craft), 천흘수형 수중익선(shallow draught hydrofoil craft) 등으로 나뉘어진다. 이 선형은 원리적으로 내항성능면에서는 매우 우수하여 연근해 여객선으로 많이 이용되고 있다.



(A) Surface piercing (B) Submerged piercing (C) Shallow draught

**Fig. 2.3 Hydrofoil craft**

### (3) 공기부양선(Hover craft)

공기부양선은 추진장치와는 별도로 기관 및 장치에 의해 공기를 선체 밑으로 뿜어 넣어 발생하는 부양력으로 선체를 수면이나 지면위로 살짝 띄운 상태로 항해하는 것이다. 선체 주위를 전부 고무스커트로 하고 공기 프로펠러(air propeller)를 사용하는 ACV(air cushion vehicle)와 쌍동선체(side hull)를 갖고 선수미에만 스커트(skirt)가 부착되고 프로펠러나 물제트 추진기를 사용하는 SES(surface effect ship)으로 구별할 수 있다.

### (4) 복합선형(Hybrid) 고속정

배수량형의 지지력인 부력, 공기부양선과 표면효과선의 지지력인 정적양력(static lift), 수중익선에서 사용되는 동적양력(dynamic lift)을 적절히 복합하여 새로운 개념의 복합선형(hybrid)을 만들어 낼 수 있다.

예를 들면, 부력 70%와 수중익 양력 30%로 지지되는 복합선형으로 SWASH (small waterplane area single hull), 부력과 수중익 양력이 각각 50%인 HYSWAS(hydrofoil small waterplane area ship), 부력 20%와 수중익 양력 80% 복합선형의 경우로는 LAHHS(large hydrofoil hybrid ship)이 각각 고려될 수 있다. 또한, 수중익 양력과 공기압이 각각 50%인 복합선형 형태로는 HYACS(hydrofoil air cushion ship), 공기압 80%와 부력 20%의 복합된 형태로는 SWAACS(small waterplane area air cushion ship)이 고려될 수 있다.



## 2.2 활주형선 선형특성

활주형선의 선형특징으로는 작은 중형비( $L/B$ )와 극도로 작은 흘수를 꼽을 수 있다. 활주형선이 완전한 활주상태에 이르면 물은 선체의 측면으로부터 떨어져 나가서 선체는 평평한 선저면 만이 물과 접하는 상태가 된다. 이와 같은 상태가 되면 배수량이라는 개념을 완전히 상실되게 되어 선박의 중량을 받쳐주는 것은 선저면으로부터 발생하는 동적인 압력만이 되며, 배수량형 선박이 중량을 아르키메데스의 정적인 힘에 의하여 받쳐지는 것과는 원리적으로 다르게 되어서 유체역학적으로도 다르게 취급하여야 한다[18].

### 2.2.1 활주형선 유체역학적 특징

선박이 전진하는 경우에 있어서 선체표면의 넓은 범위에 걸쳐서 상대속도가 전진속도보다 커지게 된다. 그에 따라서 압력은 정압력보다도 저하되게 되어 부력이 감소하게 됨으로서 선체의 침하가 일어나게 된다. 속도가 증가함에 따라서 침하량이 증가하게 되지만 조파현상이 두드러지게 되면 압력의 길이방향 부호가 변화하게 됨으로 트림의 변화가 나타나게 된다[19].

Froude 수가 어느 값 이상이 되면 선수파에 의하여 선수부에서의 압력이 상승하게 되어 선박은 선미트림을 이루게 되고 속력이 증가함에 따라서 트림도 증가하게 된다. 그에 따라서 조파저항이 두드러지게 증가하고 저항곡선에서는 커다란 저항증가(hump)가 나타나게 된다[20].

Fig. 2.4와 같이 전형적인 소형 활주형선의 저항시험결과에서 보듯이 Froude 수가 어느 값을 넘게 되면 저항값은 속력의 증가에 따라서 급격하게 증가하게 된다. 저항곡선에서 나타나는 두드러진 등성이(hump)는 조파저항의 최종 등성이에 해당되며, 이 등성이를 넘어서게 되면 속력이 증가함에 따라 조파저항이 두드러지게 줄어들게 되어 이상의 고속에서는 고속선형의 이점이 나타나게 될 수 있다. 속력증가가 계속되면, Fig. 2.5에 보여 지는 것처럼 그때까지 증가를 계속하여 왔던 트림이 감소하는 경향으로 바뀌게 되고 동시에 저항의 증가도 더 이상 나타나지 않게 되어서 전 저항은 속력의 증가에 따라서 감소하게 된다.

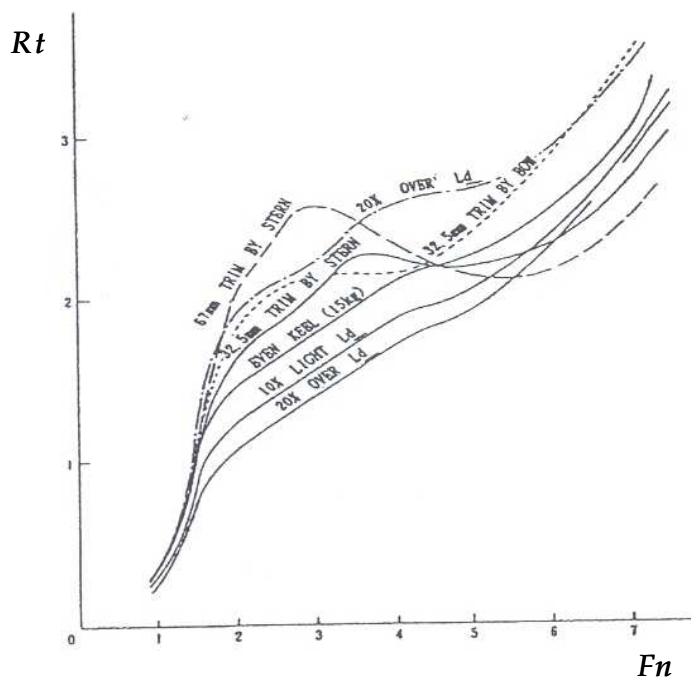


Fig. 2.4 Resistance curve of high-speed craft

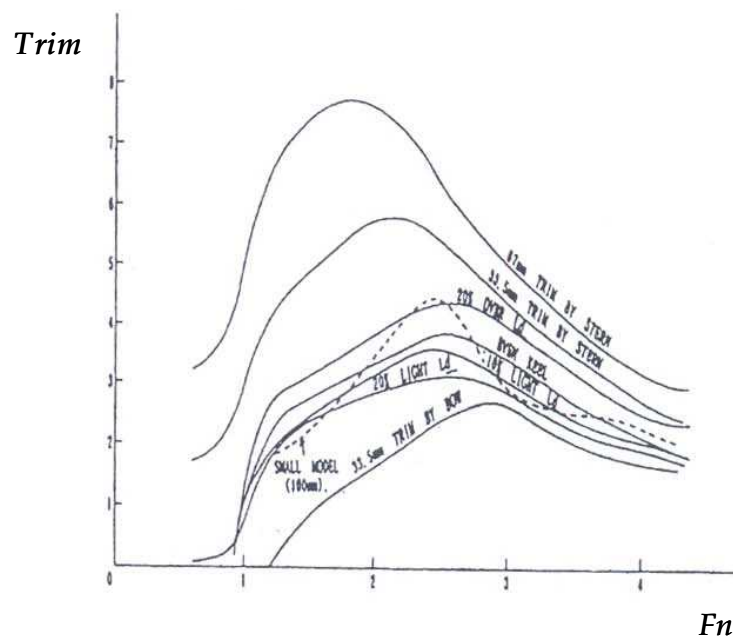


Fig. 2.5 Curve of trim

활주형선에 작용하는 유체력을 파악하기 위하여 Fig. 2.6과 같은 썰기형상의 모형을 생각하여 보자[21].

고속정에서는 트랜섬(transom) 후면으로부터 물이 떨어져나가는 것이 보통으로 나타나는 일이며 측면은 물과 접하여 있다 하더라도 그곳에 작용하는 압력은 선체에 대하여 힘을 미치지 못하므로 선체의 중량을 받쳐주는 것은 평평한 바닥면에 작용하는 유체력만이 남게 되며 바닥면에 작용하는 유체력은 수직압력( $F_N$ ), 그리고 마찰력( $D_F$ )이 있다. 바닥면이 수평면과 이루는 경사각을  $\tau$ 라 할 때 연직성분과 수평성분을 나누어 나타내면 식(2.1)과 식(2.2)와 같다.

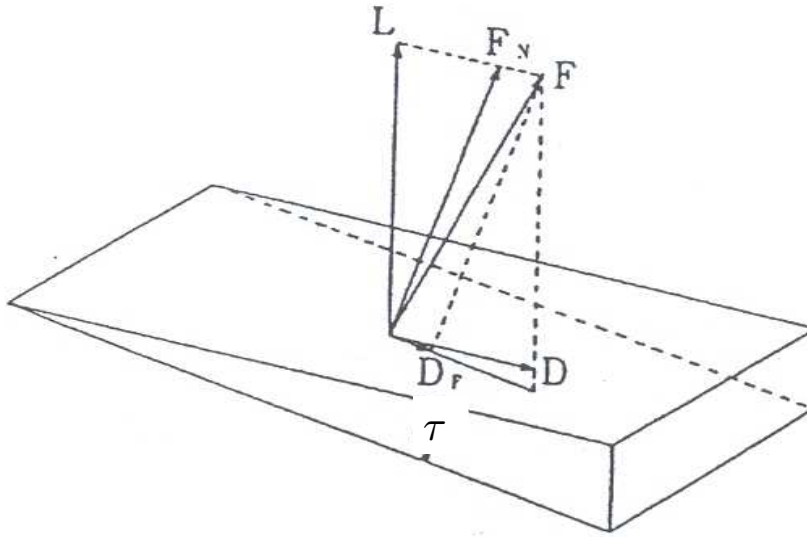


Fig. 2.6 Wedge-shape model

$$\text{양력} : L = F_N \cos \tau - D_F \sin \tau \quad (2.1)$$

$$\text{항력} : D = F_N \sin \tau + D_F \cos \tau \quad (2.2)$$

마찰력은 일반적으로 수직압력에 비하여 작아지고  $\tau$ 도 작기 때문에 마찰력에 의하여 양력이 작아지는 것은 무시하여도 좋다. 따라서 고속정의 중량을  $W$ 라 하면 식(2.3)과 식(2.4)이 성립하게 된다.

$$W = F_N \cos \tau \quad (2.3)$$

$$R = W \tan \tau + D_F \cos \tau \quad (2.4)$$

즉, 압력저항은 고속정의 중량과 바닥면의 기울기 혹은 자세에 따라서 결정되게 되고 속력과는 무관하게 된다. 이는 통상의 선박과는 다른 점이 되며 식(2.4)의 양변을 선체중량( $W$ )으로 나누어 단위중량당의 저항 혹은 항양력비로 나타내면 식(2.5)식이 된다.

$$\frac{R}{W} = \tan \tau + \frac{D_F}{W} \cos \tau \quad (2.5)$$

고속정의 압력저항을  $R_R$ 이라 하고 마찰저항을  $R_F$ 하면 식(2.6)식과 (2.7)식이 얻어진다.

$$R_R = W \tan \tau \quad (2.6)$$

$$R_F = D_F \cos \tau \quad (2.7)$$

선체중량  $W$ 는 일정한 값이기 때문에 고속정의 자세와는 무관한 일정한 값이 됨으로 잉여저항은 속력에 무관한 일정한 값이 된다. 이러한 점이 일반적인 선박의 저항과는 달라지는 점이다. 침수길이를  $l$ , 바닥면의 폭을  $b$ , 마찰저항 계수를  $C_F$ 라 놓으면 고속정의 측면이 물과 접하고 있지 않지만 식(2.8)의 관계가 성립하게 된다.

$$D_F = \frac{1}{2} \rho V^2 b l C_F \quad (2.8)$$

측면이 접수되어 있다면 침수면의 표면길이를 택하여야만 하지만 식이 복잡하게 되므로 여기서는 물이 측면으로부터 떨어져 있는 상태만을 다루기로 한다. 한편 양력은 정적인 부력과 동적인 양력이 되고 바닥면에 수직한 압력 계수는  $\sin \tau$ 에 비례한다고 생각하여  $C_N \sin \tau$ 라 놓으면 식(2.9)이 얻어진다.

$$F_N = \frac{1}{2} \rho g b l^2 \sin \tau + \frac{1}{2} \rho V^2 b l C_N \sin \tau \quad (2.9)$$

$$\text{혹은} \quad W = \frac{1}{2} \rho g b l^2 \left(1 + C_N \frac{V^2}{gl}\right) \sin \tau \cos \tau \quad (2.10)$$

그리고 정지상태에서의 수선의 길이를  $l_w$ 라고 쓰기로 하면

$$W = \frac{1}{2} \rho g b l_w^2 \tan \tau \quad (2.11)$$

이 되므로 (2.10)식을 (2.11)식으로 나누어 주면 식(2.12)로 되며,

$$\left[ \left( \frac{l}{l_w} \right)^2 + \left( \frac{l}{l_w} C_N F n^2 \right) \right] \cos \tau^2 = 1 \quad (2.12)$$

여기서  $Fn$ 은  $l_w$ 를 기준으로 하는 Froude 수 ( $Fn = V / \sqrt{g l_w}$ )로 된다. 이로 부터 식(2.13)이 얻어진다.

$$l = \frac{l_w}{2} \cos \tau \left[ \sqrt{(C_N F n^2 \cos \tau)^2 + 4} - C_N F n^2 \cos \tau \right] \quad (2.13)$$

Froude 수가 증가하게 되면 그에 따라서  $l$ 이 감소하게 되는 것은 당연하지만 이 식을 식(2.8)에 대입하고 식(2.11)을 이용하게 되면 마찰저항의 항은 식(2.14)과 된다.

$$\frac{D_F \cos \tau}{W} = C_F \frac{F n^2}{2 \tan \tau} \left[ \sqrt{(C_N F n^2 \cos \tau)^2 + 4} - C_N F n^2 \cos \tau \right] \quad (2.14)$$

이는 경사각  $\tau$ 를 일정하다고 할 때 Froude 수가 낮을 때에는 Froude 수의 증가에 따라서 함께 증가하게 되지만 높은 Froude 수에서는 일정한 값  $C_F / (C_N \sin \tau)$ 에 가까워지게 된다. 따라서 전 저항은 식(2.15)로 되고 횡축에

$$\frac{R}{W} = \tan \tau + \frac{C_F}{(C_N \sin \tau)} \quad (2.15)$$

$\tau$ 를 잡으면 Fig. 2.7에 보인 것과 같이 전 저항이 극소가 되는 최적의 경사각  $\tau$ 가 존재하게 된다. 식(2.15)로부터 전 저항이 수직압력 계수  $C_N$  혹은 양력계수에 의하여 지배되게 됨으로 양력에 비하여 저항계수는 부차적인 것으로 볼 수도 있게 된다.

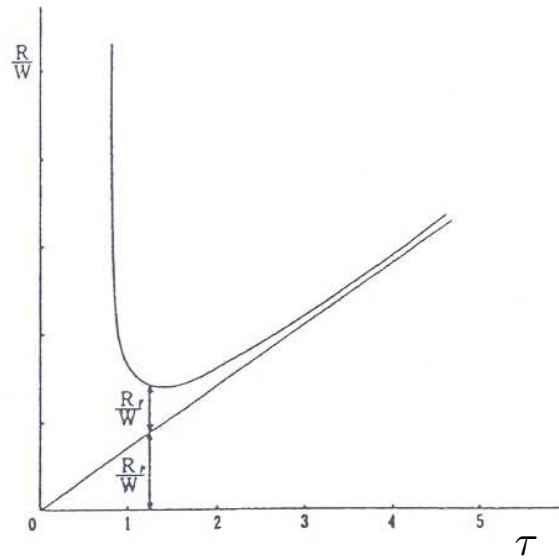


Fig. 2.7 Drag to lift ratio of wedge shape model

식(2.13)의 항력과 양력의 관계는 활주형선에서는 항력이 양력에 거의 비례하는 것으로 나타나고 있다. 이는 고속 활주형선과 수중익선의 이해득실을 비교할 때 중요한 점이 된다. 즉, 수중익선에서는 선체중량이 가벼울 때에는 고속일 때에 유리한 것에 대하여 중량이 커질 때에는 고속정 쪽이 유리하게 된다. 선저경사를 주었을 때의 어떠한 영향이 나타날 것인가를 알아보기 위하여 Fig. 2.8과 같은 V 자형의 바닥모양을 가지는 형상을 나타내었다.

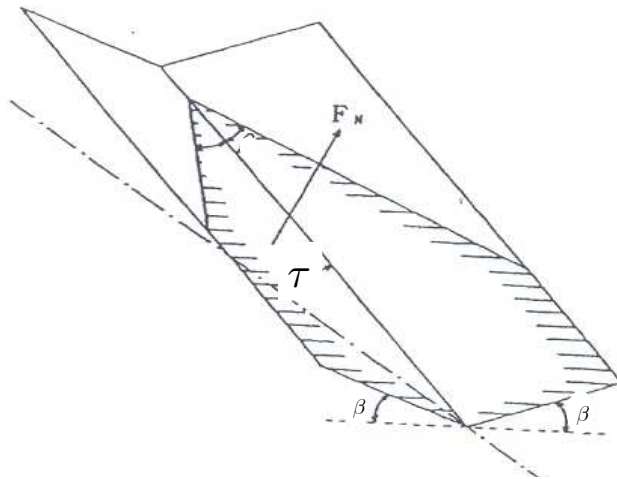


Fig. 2.8 V-shape model (Schematic)

킬(keel)의 경사를  $\tau$ , 연직면상에서 측정한 선저경사 각도를  $\beta$ 라고 하면, 수직압력  $F_N$ 과 양력  $L$ 과의 관계는 마찰력을 무시하면 식(2.16)과 같이 되고

$$L = \frac{F_N \cos \tau}{\sqrt{1 + \cos^2 \tau \tan^2 \beta}} \quad (2.16)$$

수직압력중에서 양력에 기여하는 비율이 평면일 때보다 줄어들게 된다. 따라서 동일한 중량을 받쳐주기 위하여서는 커다란 수직압력이 필요하게 되고 그 결과 침수표면적도 늘어나게 된다. 이로 인하여 마찰저항의 증가로 이어지게 된다. 그리고 바닥면 법선의 전후방향축에 대한 방향 여현은  $\sin \tau / \sqrt{1 + \cos^2 \tau \tan^2 \beta}$ 로서 이는 바닥면의 전진방향에 대한 기울기이기 때문에 평면의  $\sin \tau$ 에 비하여 감소하게 된다. 수직압력 계수를 단순히 기울기에 비례하는 것이라고 한다면, 수직압력도  $1 / \sqrt{(1 + \cos^2 \tau \tan^2 \beta)}$ 의 비율로 감소하게 됨으로 동적인 양력은  $1 / (1 + \cos^2 \tau \tan^2 \beta)$ 의 비율로 감소하게 된다. 한편 압력저항도 양력과의 비율은  $\tan \tau$ 의 비율로 변화하지 않으므로 킬의 기울기가 일정하다면 압력저항에는 변화가 없다. 즉, 이와 같은 형상에서는 선형에 따라서 압력저항 혹은 잉여저항은 변화하지 않으며, 이것이 배수량형 선박과는 두드러지게 다른 점이 된다. 그에 대신하여 양력이 감소하게 됨에 따라서 침수표면적이 증가하고 마찰저항의 증가가 나타나게 된다. 내항성은 높이기 위해서는 선저경사를 키워주는 것이 바람직하지만 그에 따라서 저항이 증가하게 됨으로 이들의 상호절충이 설계의 중요한 요점이 된다.

## 2.2.2 활주형선 저항

고속선박에서 공기저항은 공기와 물의 밀도 비에 따라 상당히 작은 부분을 차지한다. 따라서 일반적인 저항성분으로는 수중과 수면에서의 점성저항과 조파저항으로써 생각할 수 있지만, 활주형선에는 활주시 나타날 수 있는 스프레이(spray)상태에 대응하는 스프레이(spray) 저항이 있다[22].

### (1) 점성저항(Viscous resistance)

물의 점성 때문에 생기는 저항을 말하고, 점성저항은 두 가지로 분류되는데, 물체의 표면과 물의 마찰에 의해 생기는 마찰저항과 물체주위의 물의 압력에 의해 생기는 형상(혹은 압력)저항으로 분류된다.

고속 활주형선의 점성저항은 일반 배수량형 선박에서의 개념과 다르다. 즉, 형상저항이라는 것은 물체가 물 속 깊이에서 움직일 경우 물에 주는 힘의 반작용으로써 생기는 것인데 활주형선과 같이 동적양력에 의해 선저판만으로 달리는 선박의 경우에는 마찰저항만을 고려한다.

## (2) 조파저항(Wave making resistance)

조파저항은 물체가 움직임으로써 수면 가까이 혹은 수면상에 공급하는 에너지의 변형으로써 생긴 파에 의한 저항으로 큰 파를 만들면 그것만으로도 저항이 크다고 할 수 있다.

일반 배수량형 선체에서는 선수와 선미에 접근되는 파가 합성되어 배에 의해 만들어진 파가 되고, 이 파의 선수파에 의한 파정과 선미파에 의한 파정, 또 선수파에 의한 파저와 선미파에 의한 파저 등이 중첩되어 합성될 때 최대가 되고, 파정과 파저가 중첩될 때가 가장 작다.

고속 활주형선의 경우에는 차인(chine)에 의해 어깨(shoulder)를 형성하는데, 저속의 경우에는 여기서부터 어깨파가 발생한다. 선미는 트랜섬 내측에 끌어 올라오는 물 때문에 날카로워지기 때문에 선수파는 없고, 이 어깨파(shoulder wave) 발생위치는 선수미 파의 중간에 있고 외관상 수선길이가 짧은 경우에는 조파저항이 일반 선형보다는 크다.

그러나 속도가 높아지고 속장비가 3.25~3.35정도가 되면 선미 트랜섬에 유입된 물이 가속되어 선체로부터 분리되고, 트랜섬 전체가 물의 침수되지 않는 상태로 된다. 선미의 물은 수면에서 칼로 잘라 낸 형상을 하고, 수선장을 약 20%정도 선미를 연장시킨 것과 같은 모양의 효과를 나타낸다. 그리고 선체는 배수량이 약 5% 감소하고, 동일 결과로써 속력 증가를 가져온다. 이때 선수 어깨파는 얇은 막의 형상을 나타내고, 차인에 의해 박리되며, 그 후 선측 외판을 따라 내려간 물은 선미에서 낙차가 발생하여 삼각형으로 교차하고 그곳에서 선미파를 형성한다.



### (3) 스프레이 저항(Spray resistance)

고속 활주형선은 배수량형 선형의 경우처럼 부력보다는 유체동력학적 양력에 의해 선체를 지지한다. 그래서 활주형선은 저면에 고압부분을 가지며 이것이 선체의 양쪽으로 나가는 스프레이를 형성한다.

선체의 속도가  $Fn = 0.9 \sim 1.0 (V/\sqrt{L} = 5.5 \sim 6.0)$ 이 되면 선체의 배수량은 다시 12.5%정도 감소를 보인다. 중량은 변하지 않겠지만 선저에 양력이 작용해서 부상하는 상태가 된다. 중요한 것은 활주형선에서는 이 상태를 어떻게 유효하게 이용하느냐는 것이다. 이 상태 이상이 되면 선수 어깨파는 완전히 스프레이를 형성하는 스프레이 저항이 되며, 어깨파와 선수재가 스프레이의 앞끝에 있는 것을 관측할 수 있다. 이것은 조파저항이 변화한 것으로 볼 수 있다. 이때 선체는 선저판으로만 지지되고, 선저판에 대해서는 마찰저항만 있다. 고속 활주시의 저항이 스프레이 저항과 마찰저항의 2가지가 되는 이유이다. 양력이 작용하여 양력 중심의 이동으로 선수 내림모멘트가 작용해 마치 돌고래 현상(porpoising)이라 하는데, 활주상태가 되면 활주형선에서는 이 현상을 피할 수가 없다. 따라서 당연히 피칭(pitching)을 감소시키는 형태로 선체를 운용하여야 한다.

### 2.2.3 활주형선 유체력 계산

Daniel Savitsky는 활주형선 관련 실험과 연구를 바탕으로 동역학적인 힘을 고려한 설계에서의 요구마력과 돌고래 현상의 안정성을 예측하기 위하여 간단한 계산과정으로 정식화된 식들을 제안하여 현재 많은 소형 고속 활주형선의 초기설계과정에서 유용하게 수행되어지고 있다. 본 절에는 시험대상 선형의 유체역학적 특성분석에 사용된 Savitsky의 유체력 계산식을 정리하여 보았다[10].

활주평면에서의 압력분포를 알아보기 위해 평판을 수면에 끌어봄으로서 확인하였는데 Fig. 2.9에 보이는 바와 같이 정체점(stagnation point)에 최고압력을 보이며, 후방으로 갈수록 압력이 낮아지는 분포를 보이고 있다.

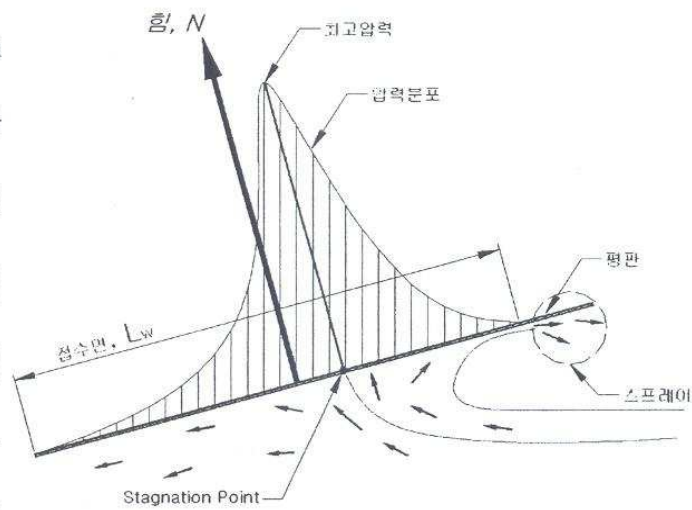


Fig. 2.9 Pressure distribution of planing surface

완전 활주상태에서는 이러한 최고압력이 선박의 무게와 가까워진다고 볼 수 있다. 이러한 압력은 양력의 성분과 저항의 성분으로 나누어질 수 있으며, 그 힘의 분포는 Fig. 2.10과 같다.

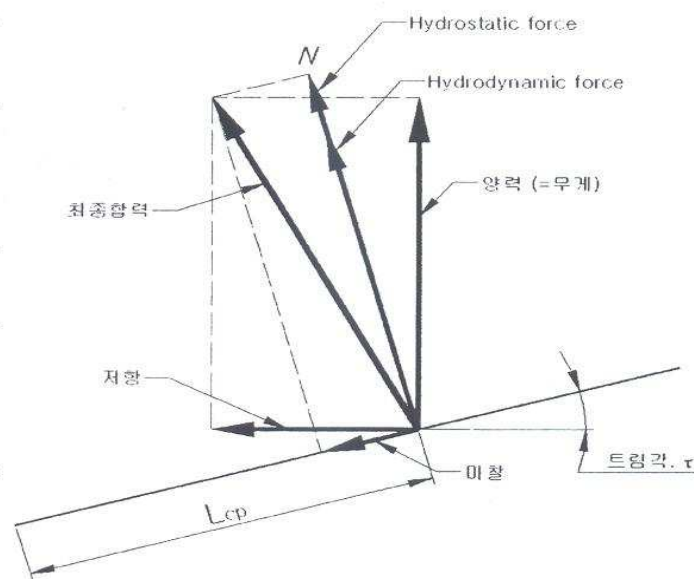


Fig. 2.10 Force distribution of planing surface

한편, Savitsky는 활주상태에서의 양력을 구하는 식(2.17)을 제안하였다.

$$C_{L0} = \tau^{1.1} \times [0.012 \times \lambda^{0.5} + 0.0055 \times \frac{\lambda^{2.5}}{C_v^2}] \quad (2.17)$$

여기서,  $C_{L0} = \frac{\Delta}{0.5 \rho V^2 b^2}$ ,  $\tau = \text{trim degree, } (^\circ)$   
 $\lambda = \text{wetted length-beam ratio, } C_v = V/\sqrt{gb}$

식(2.17)의 Froude 수에서 접수면의 길이를 적용한 것이 아니라 배의 접수면의 폭을 무차원화 하여 사용한 것으로서, 고속 활주형선의 경우 배의 침수 길이는 주행트림, 무게, 속력 등에 따라서 변화가 다양하지만 침수 폭은 거의 일정하게 적용된다.

또한, 고속 활주형선의 트림각을 결정하는 중요한 요소인 압력중심점의 위치를 찾는 식(2.18)을 제안하였다.

$$C_P = \frac{l_p}{\lambda b} = 0.75 - \frac{1}{(\frac{5.21 \times C_v^2}{\lambda^2}) + 2.39} \quad (2.18)$$

여기에 접수면의 길이를 측정하는 것은 길에서와 같이 차인에서의 길이를 모두 고려하여야 하므로 두 길이의 평균값으로 한다. 활주형선의 경우에는 선저경사각(deadrise)를 갖고 있는데, 이는 선체 킬로부터 선측의 차인까지 일정한 각도를 가지고 있다.

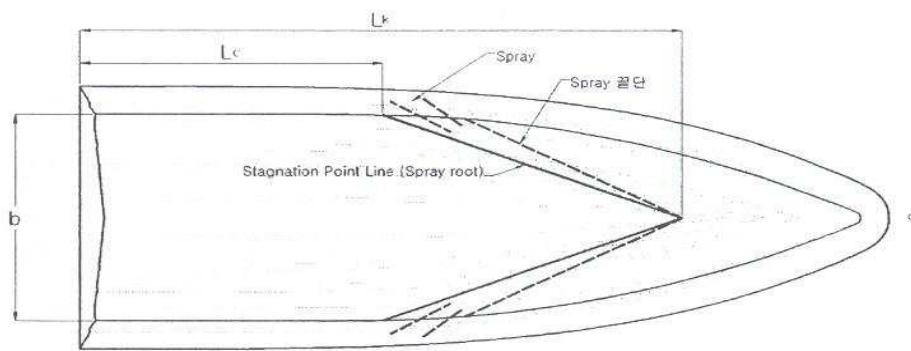


Fig. 2.11 Length to beam ratio of wetted area

이러한 형상에서는 스프레이가 선저경사각을 따라서 선체뒤쪽으로 흐르게 되고 이러한 작용은 마찰저항의 증가로 나타나게 된다. 이러한 효과를 측정하고 접수면의 폭장비에 수정치를 적용하여 선저경사각에서의 양력을 추정할 수 있는 계산식 식(2.19)을 제안하였다.

$$C_{L\beta} = C_{L0} - 0.0065 \times \beta \times C_{L0}^{0.6} \quad (2.19)$$

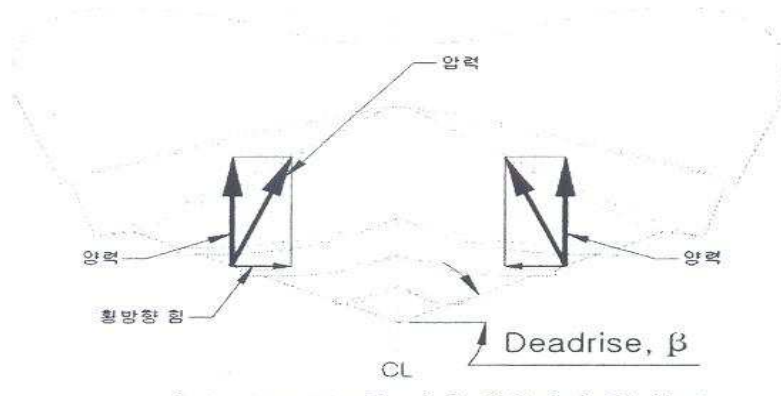


Fig. 2.12 Force distribution of planing surface with deadrise

또한, 마찰저항의 계산식도 제안하였다. 마찰저항의 기본계산식은 식(2.20)

$$R_F = C_F \times 0.5 \times \rho \times V^2 \times S_w \quad (2.20)$$

으로 표현되지만 여기서의  $S_w$ 는 스프레이 영역을 포함한 활주 선체면의 면적이므로 면적계산은 식(2.21)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_w = \frac{L_m}{b} \times b \times \frac{b}{\cos \beta} = (\lambda + \Delta \lambda) \times \frac{b^2}{\cos \beta} \quad (2.21)$$

따라서 활주선체 전체에 걸리는 저항의 계산식은 식(2.22)로 제안하였다.

$$R_f = C_F \times 0.5 \times \rho \times V^2 \times (\lambda + \Delta \lambda) \times \frac{b^2}{\cos \beta} \quad (2.22)$$

여기서,  $\Delta \lambda$ 은 선저경사각과 트림각의 변화에 따른 접수면의 폭장비(스프레이 효과면에 의해 수정된 것)로서 Fig. 2.13의 도표에서 구할 수 있다.

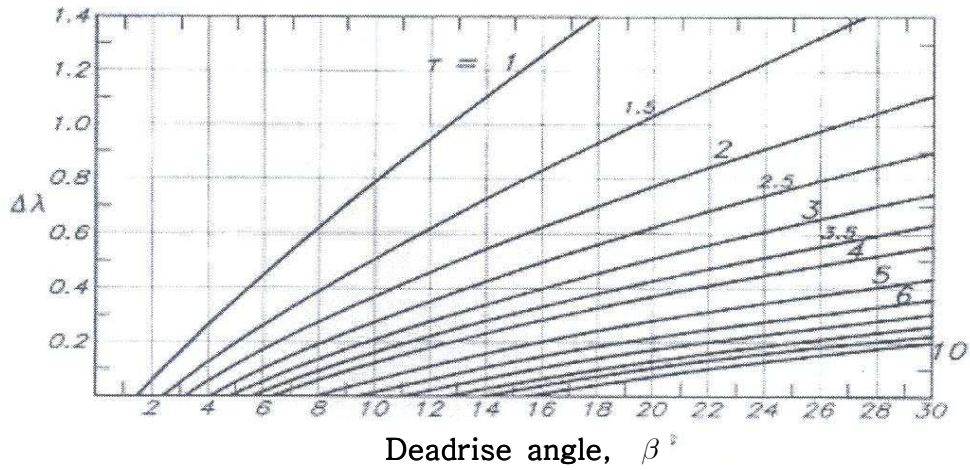


Fig. 2.13 L/B ratio of trim and deadrise

이렇게 저항값을 구하고 이 값에 의하여 레버 암(lever arm)을 구하는 식 (2.23)을 제안하였다.

$$f_f = VCG - \frac{b}{4} \times \tan \beta \quad (2.23)$$

이러한 레버 암(lever arm)을 포함하여, 활주형선에 적용되는 힘의 분포에 대하여 Fig. 2.14에 도시하였다.

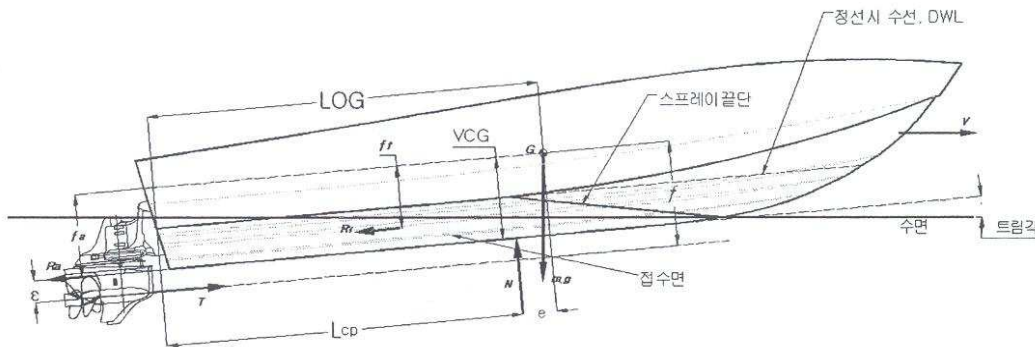


Fig. 2.14 Force distribution of planing craft

또한, 부가물들에 대한 저항값을 구하는 식들을 제안하였는데, 타(rudder)에 대한 저항을 구하는 식(2.24)을 제안하였다.

$$R_r = C_{Fr} 0.5 \rho V^2 S_r \left[ 1 + 2 \frac{t}{c} + 60 \left( \frac{t}{c} \right)^4 \right] \quad (2.24)$$

프로펠러 축계에서의 저항에 대한 식은 식(2.25)와 같다.

$$R_{Fsh} = 0.5 \rho V^2 I d (1.1 + \sin^3 \epsilon + \pi \cdot C_{Fsh}) \quad (2.25)$$

현재의 레저보트 추진기 방식은 선외기(out-board) 또는 선내기(stern-drive 또는 water-jet 등)가 주로 적용되고 있으므로 여기서 계산되어진 식(2.24)와 식(2.25)는 일부 배수량이 비교적 큰 패밀리형 레저보트 외에는 사실상 찾아보기 힘들고, 추진기 형상 및 저항이 비교적 크지 않으므로 생략되기도 한다.

Fig. 2.14와 같이 선박의 무게중심점에서 수직으로 작용하는 힘과 선체면에 작용하는 압력  $N$ ,  $R_f$ ,  $R_a$  등은 선수 내림모멘트(bow-down moment)를 발생시킨다. 여기에 유효한 레버 암(lever arm)은  $e$ ,  $f_f$ ,  $f_a$  등이다. 이와 반대로 추진기에서 생성되는 추력은 선수 올림모멘트(bow-up moment)를 발생시킨다. 여기에 유효한 레버 암(lever arm)은  $f$ 이다.

활주 주행중에는 활주형선에 작용하는 힘들과 모멘트들이 서로 긴밀하게 작용하여 최종적으로 주행트림을 결정하게 되며, 이러한 주행트림은 고속선박의 유효한 속도에서 주행운동성능을 좌우하는 중요한 요소이기 때문에 잘 계산되어야 한다. 이러한 주행트림이 부정확하게 계산되면 돌고래 현상 등의 불안정한 운동을 발생시킨다. 지금까지의 계산을 통하여 선수에 걸리는 최종 모멘트를 계산할 수 있다.

$$M_N = g \cdot m \left[ \frac{e \cdot \cos(\tau + \epsilon)}{\cos \epsilon} - f \cdot \frac{\sin \tau}{\cos \epsilon} \right] \quad (2.26)$$

$$M_f = R_f \cdot \left[ f_f - (e \cdot \tan \epsilon) - \frac{f}{\cos \epsilon} \right] \quad (2.27)$$

$$M_a = R_a \cdot \left[ f_a - (e \cdot \tan \epsilon) - \frac{f}{\cos \epsilon} \right] \quad (2.28)$$

$$M = M_N + M_f + M_a \quad (2.29)$$

예상되는 트림 각에서 선수 내림모멘트가 발생하게 되면, 새로 생성되는 작은 트림 값에 의해서 동역학적인 힘이 감소하게 되고, 이로 인해 접수면이 증가하게 되므로 여전히 유효한 양력을 받을 수 있게 된다. 만약 이때까지 충분한 양력을 받지 못하게 되면, 선체는 유효한 양력을 갖게 될 때까지 계속 앞으로 숙이며 트림 값이 감소할 것이다. 이후 유효한 양력을 다시 얻게 되면 선수 올림모멘트가 발생하게 됨으로서, 이러한 일련의 운동이 반복적으로 진행될 수밖에 없다.

따라서, 여기에서 초기 예상되는 두 개의 트림각에 대한 영의 모멘트 (zero-moment)를 구해야 하며, 이를 위하여 선형보간법으로 식(2.30)과 같이 계산을 수행한다.

$$\tau_0 = \tau_1 - \frac{M_1 \cdot (\tau_2 - \tau_1)}{M_2 - M_1} \quad (2.30)$$

식(2.30)을 보정값으로 하여, 영의 모멘트에서의 저항값 식(2.31)을 구하기 위하여 선형보간법으로 다시 계산을 수행한다.

$$R_{f0} = R_{f1} + \frac{R_{f2} - R_{f1}}{\tau_2 - \tau_1} \cdot (\tau_0 - \tau_1) \quad (2.31)$$

이상의 결과들로서, 최종적인 저항산출 식(2.32)과 유효동력 식(2.33)을 제안하였다.

$$R = [g \cdot m \cdot \sin \tau_0 + R_{f0}] \cdot \frac{\cos(\tau_0 - \epsilon)}{\cos \epsilon} \quad (2.32)$$

$$P_E = V \cdot R \quad (2.33)$$

## 2.3 활주형선 설계

고속 활주형선 설계자는 개발대상 활주형선의 폭을 넓게 할 것인지 좁게 할 것인지, 차인을 낮게 또는 높게 할 것인지, 깊은 V형상을 적당하게 또는 극단적으로 할 것인지 등 세부사항까지도 선택해야 한다. 설계자는 이러한 상반되는 요구들 사이에서 속도, 용도, 운항조건 등에 대한 최적의 설계를 위해서 균형을 찾아야 한다.

본 절에서는 고속 활주형선의 설계 및 선형개발을 위해 고려하여야 할 사항과 중요한 기술적인 부분에 대하여 정리하였다.

### 2.3.1 활주형선 핵심요소

#### (1) 활주표면 (Planing surface)

활주표면은 작은 각도로 물의 표면상을 달릴 때 일어나며, 활주표면의 앞쪽으로 나아가는 운동과 물의 표면사이의 상호작용이 양력을 발생시킨다. 이 힘(양력)은 활주표면에 직각방향으로 많거나 작을 수 있지만, 일반적으로 거의 수직 상방향이라는 것을 의미하며, 이러한 힘이 물로부터 보트를 들어 올려 물과 접하는 선체의 면적을 줄이면서 마찰을 줄이고, 파를 만들어내는 조파저항도 줄인다.

초기 활주형선은 선미방향(가장 무거운 곳)으로는 뚜렷한 평판 선저를 가져 최대의 양력을 발생시켰으며, 안정성과 파 충격을 줄일 수 있도록 날씬한 V형상이 선체 바닥에 적용되었다. 넓은 폭의 선형은 선체의 상당한 양이 물속에 남기 때문에 선박의 안정성을 제공하지만, 속도가 증가하면 양력은 선미부분에 집중되어 균형점을 찾는 것이 어려워져 활주형선이 심하게 선수가 피칭하는 돌고래 현상을 시작할 수 있거나 불안정한 운동을 보일 수 있다.

현재의 고속 활주형선은 좁은 폭을 갖는 경향을 보이는데, 이는 선체의 더 앞쪽으로 양력을 발생시켜 속도 증가시에 선체가 물에서 뜰 때, 종방향 안정성을 확보하기 위한 것이다. 길고, 폭이 좁은 선체와 깊은 V형 선체의 도입은 양력의 포인트를 보다 앞쪽으로 이동시키는데 기여한다.

폭이 넓은 선체는 근본적으로 폭이 좁은 선체보다 횡방향으로 더 안정적이다. 깊은 V형 선체가 활주시 경사하면, 한쪽 면은 물 표면에 의해 더 많은



편평한 면을 갖으며, 다른 면은 더 심한 가파른 면을 갖는다. 결국 상당한 양력이 더 낮은 편평한 면으로 이동된다. 그리고 이러한 양력의 이동은 선체를 되돌리려고 하는 힘을 발생시킨다. 넓은 폭은 확실히 좀더 강력한 직립 모멘트를 발생시키고 활주형선을 더 안정하게 한다.

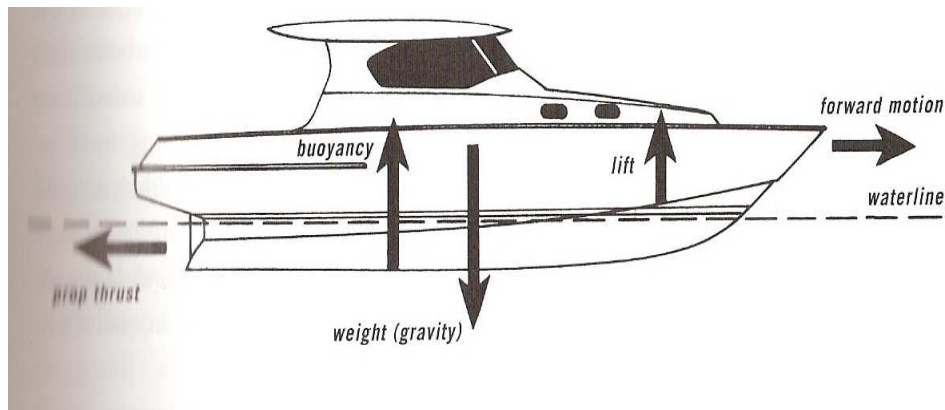
## (2) 중력과 부력 (Gravity and Buoyancy)

활주형선에 작용하는 기본적인 두 가지의 힘은 Fig. 2.15와 같이 중력과 부력으로 나누어지며, 무게 중심을 통해 아래방향으로 미치는 중력, 부력중심을 통해 상방향으로 미치는 부력의 힘에 대응해 평행을 유지하게 된다.

날씬한 선수를 가진 보트는 앞쪽의 부력이 작아짐에 따라 부력중심은 선수 쪽으로 빠르게 이동하지는 않으며, 파가 이러한 날씬한 선수를 지나갈 때에는 적은 부력이 발생하여, 파에 부력의 반응이 늦어지고 위쪽 방향으로 미치는 힘도 적는데, 이는 선수가 파에 의해 뜨는 것보다 파를 통과하기 쉽다는 것을 의미한다.

파로 인한 부력 중심의 이동거리는 선체의 형상에 크게 의존하게 되는데 차인을 갖는 선형은 수선면 아래 용적의 변화가 빠르게 발생하며, 이러한 경우 빠른 부력중심의 이동은 균형을 잡기 위해 보트의 갑작스런 움직임을 발생시킨다. 깊은 V형 선체는 바닥에서부터 선측까지 좀 더 완만한 변화를 가진 선체가 변화에 좀더 천천히 반응하고, 평형상태로 복구되기까지 더 많은 양력이 요구되며, 폭이 넓은 선체는 폭이 좁은 선체의 측정 반응보다 더 빠른 변화를 일으킨다.

해상에서는 활주형선의 무게중심이 보통의 환경 상황에서는 움직이지 않는 반면, 부력 중심은 선체 주위를 지나는 파도의 움직임에 따라 활주형선을 부상시키는 상방향 힘을 발생시키면서 끊임없이 움직이게 되며, 초기 양력(lifting)과 경사(heeling) 이후에도, 파가 선체에 영향을 주는 부분에 따라 부력의 중심 이동은 계속된다.



**Fig. 2.15 Gravity and buoyancy of planing craft**

### (3) 동역학적 양력 (Dynamic lift)

활주형선에 있어서 다른 중요한 힘은 선체 활주표면과 물의 상호작용으로 발생하는 동역학적 양력이며, 활주표면과 물의 각도가 윗방향의 힘인 양력을 발생시켜 선체의 일부분을 물로부터 들어 올리면서 선체 수면아래의 용적을 줄여준다. 수면아래의 선체용적이 줄어들면 부력도 역시 줄어들어 선체가 활주하면 선체를 지지하기 위해 부력과 동적 양력이 결합됨으로써 그 효과는 두 배가 되며 중력과도 균형을 맞추게 된다. 선체의 양력 포인트는 수면이 선체와 만나는 곳에 집중되는 경향이 있기 때문에 양력 포인트는 파랑 중에서 활주형선이 달릴 때 지속적으로 움직이며, 부력중심과 같이, 양력의 중심은 활주형선이 파도와 마주치면서 앞으로 이동하고 파가 지나가면 다시 뒤쪽으로 이동한다.

선체의 동역학적인 양력은 프로펠러의 추력으로부터 발생되고, 추력은 선미나 선미주위에서 일어나면서 선체 저항을 극복하고 활주형선을 앞으로 미는 힘으로 작용하게 된다. 고속선박이 활주상태를 시작하면 조파저항은 상당히 작아지지만 선체와 물 사이의 상호관계에 의해 발생하는 마찰저항은 좀 더 커지게 되며, 활주형선이 속력을 올리게 되면 Fig. 2.16에 보는 바와 같이 선체는 좀 더 부상하게 되는데, 이때 마찰저항은 물과 접하는 선체 표면적이 줄어들기 때문에 감소하게 된다.

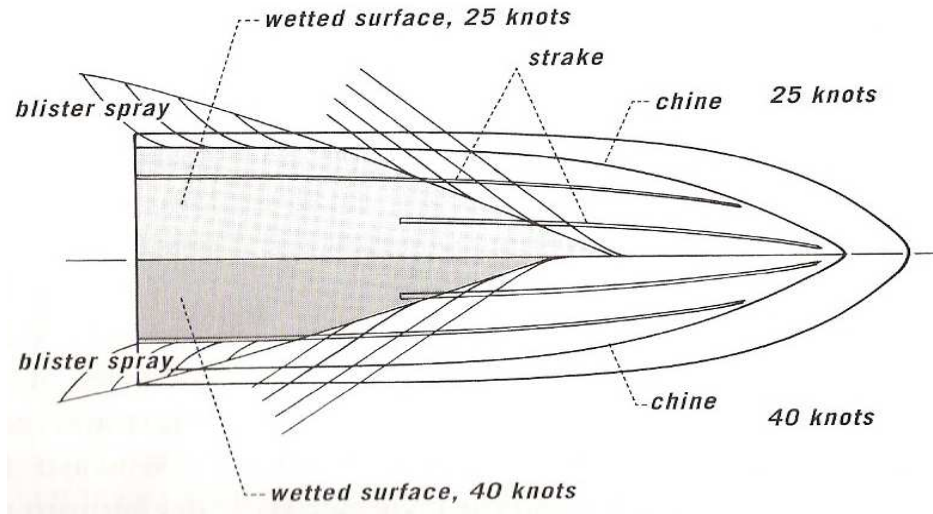


Fig. 2.16 Wetted surface of planing craft at 25knot & 40knot

#### (4) 공기역학(Aerodynamic)

선체 주위를 지나가는 바람은 고속보트 상에서 마찰과 양력 두 가지에 영향을 미쳐, 상부구조물을 지나가는 바람으로 발생하는 마찰저항은 활주형선의 속력을 낮춘다. 주로 선체는 물을 관통하기 위해 특별한 형상을 가질 필요가 있기 때문에 보트 설계자는 공기마찰저항을 줄이기 위한 제한된 요인을 가지게 되는데 상부는 최소한의 공기역학적 저항의 고려보다는 일반적으로 승선원의 미관과 안락감을 우선적으로 고려하여 제작되어지게 때문이다.

활주형선에 작용하는 바람의 영향은 양력의 발생에 따른 양의 힘과 음의 힘으로 구분된다. 양의 양력은 멀티 선체와 같이 선체사이를 지나가는 공기가 크로스 갑판의 아랫면을 쳐서 양력을 발생시키는 선체에서 발생되며, 소수의 경주용 카타마란은 에어포일과 같은 형태의 크로스 갑판을 가지게 함으로써 양력을 발생시키는 비행기 날개와 같이 작용한다. 이런 종류의 선박은 맞바람의 증가되는 마찰저항에도 불구하고 좀 더 빨라질 수 있다.

음(-)의 양력은 보트를 지나가는 바람이 상부구조물의 경사진 윗면을 칠 때 일어나며, 마찰저항을 일으키고, 활주형선을 물속으로 잠기게 하는 아랫방향의 힘을 발생시켜 물에 대한 마찰저항을 증가시키고, 활주형선의 속력을 감

소시키게 된다. 대부분의 모든 활주형선은 레저보트 등과 같은 조종실이나 브릿지(bridge)까지 경사진 상부구조물을 가지며, 바람은 이러한 구조물에 상당한 영향을 주고, 특히 맞바람에서는 체감풍속이 두 배가 될 수 있다.

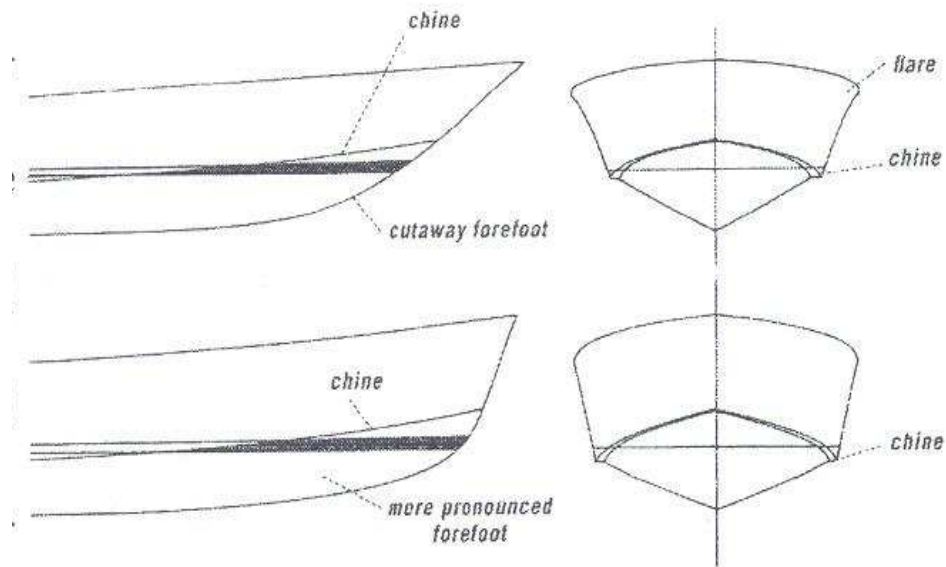
### 2.3.2 활주형선 선형설계

#### (1) Deep-V형 단동선형

깊은 V선형의 파 충격완화에 따른 항주성능은 얇은(shallow) V선형의 성능보다 대단히 뛰어나지만, 깊은 V형의 선저는 평평한 선저보다 양력을 덜 발생시키므로 활주형선의 활주상태를 유지하기 위해 더 많은 파워가 요구된다. 깊은 V선형과 얇은 V선형 사이의 핵심차이는 선저경사각에 있으며, 활주형선은 선미  $24^\circ$  정도의 선저경사각을 가지고 있다.

또한, 고속 깊은 V형 단동선은 Fig. 2.17과 같이 선수가 길고 좁은 선형이 대부분으로 이러한 좁은 폭은 고속 주행시 발생하는 선수피칭 현상을 감소시키고 선수방향의 양력집중을 줄여주며, 선수경사(cutaway forefoot)는 파를 갈라주는데 도움을 준다. 이러한 요소들은 선체가 점프하는 경우를 줄이고 파와 부딪힐 때 불안정하게 되는 것을 감소시켜 주어 선수파에는 보다 효과적으로 대응하지만, 선미파에서는 적당한 양력이 발생하도록 충분한 선수 예비부력을 가져야 하며, 선수쪽에 플레어(flare)를 적용시키거나 선수에 차인라인을 약간 낮게 두는 것에 의해 해결할 수 있다[23].

이와 대조적으로,  $30 \sim 40\text{knot}$ 의 낮은 선속에서 운항하기 위한 깊은 V선형은 더 넓은 폭과 수면에서 약간 위에서 선수와 만나는 낮은 차인라인을 갖는다. 더 낮은 속력에 대한 깊은 V형 선형설계에 있어서는, 선미 선저경사각 각도가 고속 성능의 폭이 좁은  $22^\circ \sim 24^\circ$  인 것과 비교하여  $15^\circ \sim 20^\circ$  정도이다. 설계자는 파 충격이 상당히 심해질 수 있는 곳에서의 고속성능을 위해서는 낮은 선저경사각의 효과적인 활주성능과 높은 선저경사각의 적절한 파 완충효과사이에서 상호 절충점을 찾아야 한다.



**Fig. 2.17 Bow shape for a high-speed craft with a cutaway forefoot**

## (2) 단면형상

일반적으로 고속 활주형선에 적용되는 단면형상으로는 직선형에서 원형 등 여러 가지 변화된 형태가 있으나, Fig. 2.18과 같이 직선(straight), 오목(concave), 볼록(convex), 종(inverted bell)형상의 4가지 기본 단면형상으로 분류할 수 있으며, 실제 고속 활주형선의 단면형상은 한 가지만으로 이루어진 선형보다는 운항조건에 적합한 4가지 기본 형상을 적절히 조합하고 있었다.

단면형상별 주행특성을 요약하면 다음과 같다[24].

① 직선 단면형상과 볼록 단면형상은 파랑하중에 따른 충격완화 효과를 볼 수 있어 승선원의 안락한 승선감을 유지할 수 있다.

② 오목 단면형상은 속도향상 면에서는 유리하며, 슬래밍(slamming)이 발생 등 운동성능 차원에서는 불리하다. 또한, 선속 20~30 knot에서는 적절하지만 더 이상의 고속에서는 충격하중이 커서, 엔진마력 85~100마력 범위의 선속 20knot 미만에서 많이 운항되는 것으로 알려졌다. 하지만 선수파를 잘 가르는 특정형태의 선수형상에서 부분적으로 적용한 고속의 VSC(very slender vessel)들은 이러한 형상을 취하고 있다.

③ 오목 단면형상은 선속이 35 knot 이상에서는 충격하중이 커서 다른 단면형상에 비해 승선감이 떨어지며, 볼록 단면형상은 고속 선형으로서는 불리한 선형이다. 하지만, 직선과, 볼록·오목 단면형상은 고속에서 볼록, 오목 단면형상 비해 상대적으로 충격하중이 작고, 고속선형에 적합하며, 선회성능(조종성능)도 양호한 선형이다.

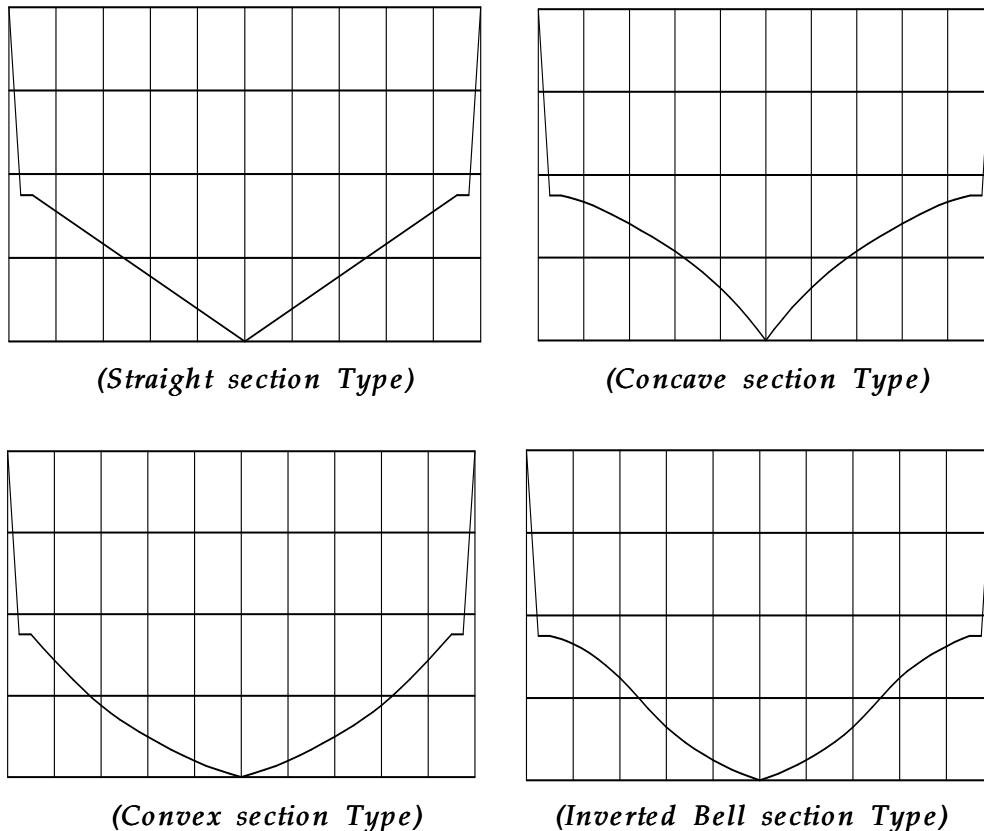


Fig. 2.18 Body plan of planing craft

### (3) 스프레이 레일(Spray rails)

깊은 V선형은 선체 양현에 스프레이 레일의 장착으로 물보라가 선체로부터 떨어져 밖으로 빳겨나가도록 하여 고속보트의 운항성능을 더 향상시킬 수 있다. 이는 횡단면에서 삼각형 모형의 가느다란 조각(strip)형태로 선체의 수면하부에 장착되며, 선수에서 선미까지 연장되어 일반적으로 킬과 평행하게

놓이게 된다. 또한, 스프레이 레일은 추가적인 양력을 발생시키는데 스프레이 레일의 평평한 삼각단면 표면은 경사진 V선형보다 양력을 발생시키는데 보다 효과적이며, 긴 레일들은 물을 흘려보내는 것이 아니라 수면 위를 타고 지나감으로서 활주형선들을 활주상태로 만드는데 매우 유용하다.

그러나 역시 스프레이 레일의 주목적은 수선면 주위의 스프레이 영역의 물들은 선체 바깥으로 벗겨 내는 것이다. 이것은 물과 접하는 선체의 면적을 감소시켜 마찰저항을 줄이는 역할을 한다. 일반적으로 스프레이 레일의 취부는 선수로부터 활주형선 길이의 2/3정도에서 끝나게 하는데, 이것은 활주형선의 선미는 매우 높은 속력을 제외하고는 물 안에 있기 때문에 스프레이 레일이 오히려 항력을 발생시킬 수 있기 때문이며, 선미부분에 스프레이 레일을 두지 않는 것은 프로펠러에 교란된 물이 유입되는 것을 방지하기 위함이다[25].

또한, Fig. 2.19와 같이 선체가 한쪽으로 기울어졌을 때 스프레이 레일의 바닥표면과 선체사이의 각도가 역 V형로 바뀌면서 고속에서 상당한 양력을 발생시키며, 선체복원력으로 작용하는데 이러한 스프레이 레일의 동역학적인 성능이 고속에서는 깊은 V형 선체의 안정성을 유지하는 핵심 특성이다.

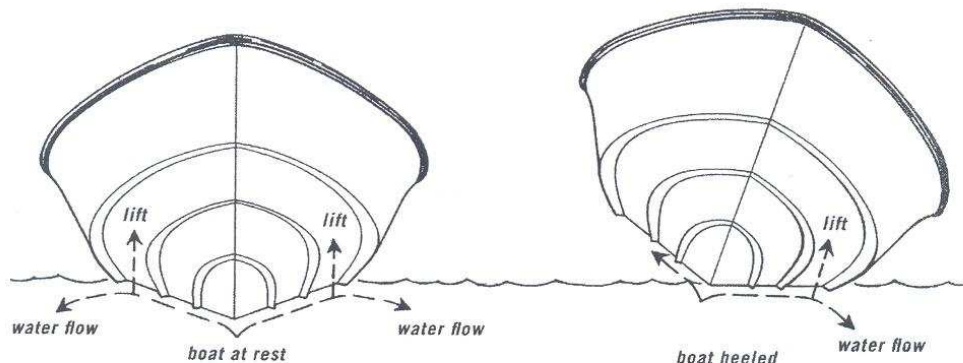


Fig. 2.19 The boat's changing attitude by spray rail

#### (4) 차인 (Chine flat)

스프레이 레일과 같이 깊은 V형 선체에서의 차인은 상당한 양력과 안정성을 제공한다. 차인은 깊은 V형에서 선체바닥의 가장자리를 따라 좁고 편평한 면적을 제공하도록 설계되며, 선수부터 선미까지 걸치는 단은 활주형선이 활

주상태에 이르는데 있어 가장 강력한 양력을 발생시킨다. 활주형선이 활주상태가 되면 차인의 앞쪽부분은 물을 부드럽게 타고, 남아있는 선미부분의 차인은 선체의 말단 끝 양력의 집중을 방지하여 선체 균형을 잡는 역할을 한다. 차인은 스프레이 레일보다 넓고 평평한 활주표면을 보이는 경향이 있어 선체 안정성의 중요한 요소가 된다.

폭이 넓은 차인은 더욱 효과적으로 양력과 안정성을 발생시키나 차인 폭이 150mm, 또는 그 이상의 경우 이러한 거친 주행성능을 일으킬 수 있으며, 이에 대한 해결책으로서 파 충격이 약간 줄여지고 승선감이 다소 나아지도록 단이 진 차인을 가지도록 설계해야 한다는 것이다. 차인으로부터 더 많은 양력을 발생시키기 위해서는 차인형상을 역 V형 형태로 하여 끝단이 아랫방향으로 향하게 하여 많은 양력을 얻고, 선체바닥면으로부터의 물이 데크 위로 올라오는 것을 방지할 수 있지만, Fig. 2.20의 역(reverse) 또는 인버트(inverted) 차인형상은 상당한 파 충격을 증가시킬 수 있다.

초고속에서는 차인이 완전히 물에서 뜨게 되어 차인으로부터 얻을 수 있는 양력이 줄어들어 활주형선이 안정성을 갖지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 하지만, 이러한 문제는 선미까지의 연장시킨 스프레이 레일에 의해 다소 해소될 수 있으며, 물의 흐름을 방해하지 않는 단 추진기(single-prop) 보트에서는 적용하는 것이 적합하다고 볼 수 있다.

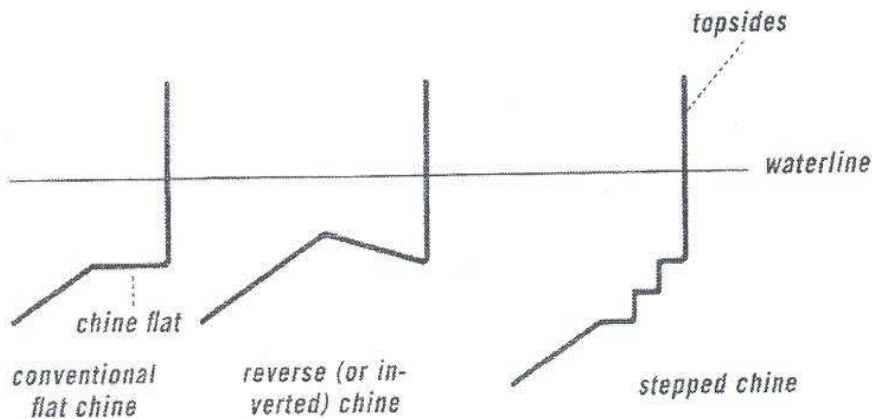


Fig. 2.20 Various chine configurations in the midsection



## 제 3 장 고속 활주형선 선형개발

### 3.1 고속 스텝(step) 적용 레저보트

고속 파워보트 및 경주용 보트의 선진국인 미국의 리갈(Regal), Bayliner, Fountain Boat 등의 업체에서는 고속화의 목적으로 기존의 선저형상과 달리 적절한 위치에 선체 안쪽으로의 급격한 스텝(step) 형상을 적용하고 있다. 이는 유체 박리를 유도하여 적은 침수표면적을 유도함으로서 마찰저항의 감소를 통해 기존 활주선형에 비해 상대적으로 우수한 고속성능과 저항감소에 따른 연비절감 효과를 거두고 있다[29].

본 절에서는 고속 스텝(step) 적용 활주형 레저보트의 선형개발을 위해 선형 개념정립과 선형설계를 수행하였다.

#### 3.1.1 스텝 적용 선형특성

##### (1) 선저 스텝 효과

스텝 적용 선형은 고속의 상태에서 종방향의 양호한 운동성능을 갖는 선형의 장점으로 '90년부터 본격적으로 사용되어 왔다. 이러한 장점이란 접수면을 여러 개의 작은 구역으로 나누고 각 구역마다 길이에 대한 넓은 폭을 갖게 함으로서 좋은 양력효과를 갖도록 한 것이다. Fig. 3.1에서 보이는 바와 같이 효율적인 여러 개의 종횡비(L/B)를 가진 접수면들이 양력을 증가시키고, 이로 인해 전체적인 접수면을 감소시키게 되므로 마찰저항도 줄어들게 된다. 이러한 여러 개의 양력지점은 고속 주행시에도 양력 지지점의 위치를 고정시키는 효과가 있으므로 종방향 주행 안정성을 향상시킬 수 있다.

한편, 선저 스텝부는 공기와 소통되지 않게 되면 스텝 주위에 흡입(suction)압력을 높여 심각한 저항의 요소로 작용하게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 스텝의 끝단이 정선 및 주행시에 수면 밖으로 연장되어 여기로 공기가 소통됨으로 스텝내부의 흡입압력을 낮추는 역할을 해야 한다.

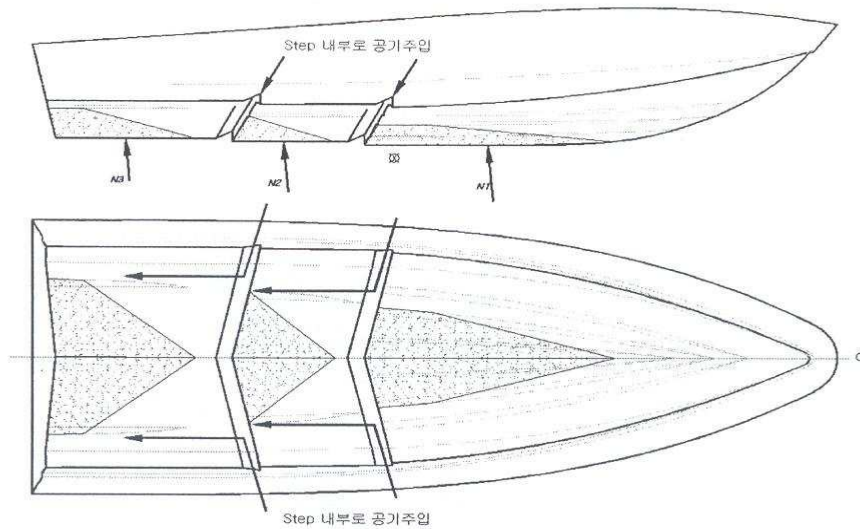


Fig. 3.1 Wetted area of stepped hull by air injection

## (2) 주요 설계변수

스텝 적용 선형은 위에 서술한 바와 같이 이점이 있으나 스텝위치, 개수, 공기유입 스텝형상, 유효양각(angle of attack), 각 스텝부의 선저경사각 및 스프레이 스트립의 수, 형상, 위치들의 미묘한 변화 등에 의해 고속에서의 주행상태가 극단적으로 변화할 수 있기 때문에 충분한 성능예측 및 선형검증이 없이는 좋은 성능을 갖기 어렵다.

또한, 스텝 적용 선형은 고속운항을 기초로 하기 때문에 선체형상의 미묘한 변화에 매우 민감하고, 크고, 갑작스런 주행상황의 변화로 나타나고 추진기의 엔진크기, 중량, 출력, 승선원 중량 등의 여러 설계변수 요소들에도 주의하여 고려해야한다. 스텝 적용 선형에서 가장 어려운 부분은 각 스텝부분에서의 양력분할에 있다. 고속에서의 각 부분의 양력 값은 약간의 트림변화에도 큰 폭으로 변화하므로 선박의 운항형상이 급격하게 변할 수밖에 없다. 이러한 문제를 해결하는 가장 좋은 방법은 성능평가 후의 좋은 성능으로 완료된 조건에서 요구마력, 허용인원 등의 운항이 상시 변할 수 있는 조건들을 최소화하는 것이며, 설계선속에서 적절한 점수면을 유지하도록 하는 것이 중요하다. 최적설계를 위해 고려해야 할 주요변수들은 다음과 같다.

### ① 선미 트림 탭(Trim tab)

선외기 또는 스텐 드라이브 등의 추진기는 자체적으로 추력방향의 조절이 가능하지만, 트림능력 범위 내에서 추진기 자체능력으로 운항성능의 제어가 불가능할 때에는 선미 트림 탭(trim tab) 등의 부가장치를 장착하여 안정성을 확보하여야 한다.

### ② 속도범위

어떤 특정속도 구간에서의 급격하게 나쁜 운항특성을 찾아내어 이 속도 영역에서의 문제를 해결해야 한다. 주로 발생하는 나쁜 운동성능으로는 특정 속도영역에서 돌고래 현상이 발생할 수 있다.

### ③ 급선회

선체가 선회할 때에는 외부공기와 소통되고 있던 스텐의 바깥쪽이 수면과 접하게 되므로 갑작스런 공기의 차단으로 인한 흡입압력이 발생하면, 한쪽으로 급격하게 속도가 줄고 작은 선회반경으로 회전하게 된다. 대부분 이런 상황에서선수가 물속에 박히며 회전방향으로 선미가 순간적으로 돌아가는 스핀아웃(spin-out)현상이 된다.

## 3.1.2 선형 개념정립

### (1) 기본계획

고속 활주형선의 국내외 실적선 자료조사, 검토와 스텐 적용 선형의 특성을 분석하여 운용개념, 운항조건, 주요개념을 설정하고, 이를 바탕으로 선형개념을 정립하였다.

- 형 태 : 선저 스텐 적용 RIB형 소형 활주형선
- 용 도 : 소형 레저보트
- 속 력 : 약 38knot (시운전 최대출력), 약 35knot (설계선속)
- 주 기 관 : 약 240hp × 4000rpm, stern drive 1set
- 최대승선원 : 약 10명 (안전요원 2명, 조타수 1명, 조난자 7명)

#### ① 선체규모

전체 승선인원은 4인 가족단위의 2가족이 해양레저 기능에 충족시킬 수 있도록 하기 위하여 조타수 1~2명과 승선인원 8~9명을 포함하여 최대 승선인원은 약 10명으로 계획하였다.

#### ② 속력

현재 국내에서 보급되고 있는 전장 7.0 m급 RIB형의 소형 고속 활주형선은 통상 30 knot정도로서 운항되고 있으며, 필요에 따라 엔진마력을 증가시켜 고속을 내고 있다. 하지만, 고속 레저보트 운용 선주와 탑승 승선원들의 요구 선속 등을 고려하여, 고속 스텝 적용 레저보트의 최대속력은 38knot 이상을 목표로 설정하였다.

#### ③ 주기관 마력

주기관은 저항감소에 따른 고속성능과 연비절감을 고려하여 추진효율이 우수한 스텐 드라이브(stern drive)를 주기관으로 선정하였고, 주기관의 마력은 유사실적선의 선형규모, 선속 및 탑승인원 등을 고려 대략 약 230~240 마력으로 계획하였다.

#### ④ 선체 재질

선체 재질은 가벼우면서 파랑충격에 대한 충분한 구조강도 특성을 가지며, 국내에 비교적 접근 및 제작이 용이한 F.R.P(fiber reinforced plastics)로 선정하였다.

### (2) 주요치수 선정

고속 스텝 적용 레저보트의 선체길이는 실적선의 주요목 범위, 승선인원 등의 고려와 해양레저 활동의 원활한 기능수행을 위하여 약 7m급으로 결정하였다. 고속 활주형선의 경우 종횡비(L/B)가 5.0 이상일 때 저항이 현저히 감소하는 경향을 보이고 있으나, 이 조건을 만족시킬 경우 대상선박의 선체 폭은 1.4m 이내로 작게 되어 횡요 안정성이 나빠질 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 일본의 Niwa가 제안한 경험식 식(3.1)을 이용하여 흘수선에서의 선체 폭을 약 2.5m정도로 결정하였다.

$$B = 0.65 \sim 0.75 \cdot Loa^{0.575} \quad (3.1)$$

선체 깊이와 길이와의 관계는 선체 종강도에 큰 영향을 주는 인자로서, 종강도를 고려하여 깊이를 크게 하였을 경우에는 선체중량이 과도하게 되어 추진성능에 좋지 않은 영향을 주게 되므로 적절한 크기를 선정하여야 한다. 선체깊이는 경험식 식(3.2)을 토대로 0.90~1.0m 사이가 되는 약 0.95m 정도로서 선체 깊이를 결정하였다.

$$D = 0.2 \cdot Loa^{0.8} \text{ 또는 } D = 0.5B \quad (3.2)$$

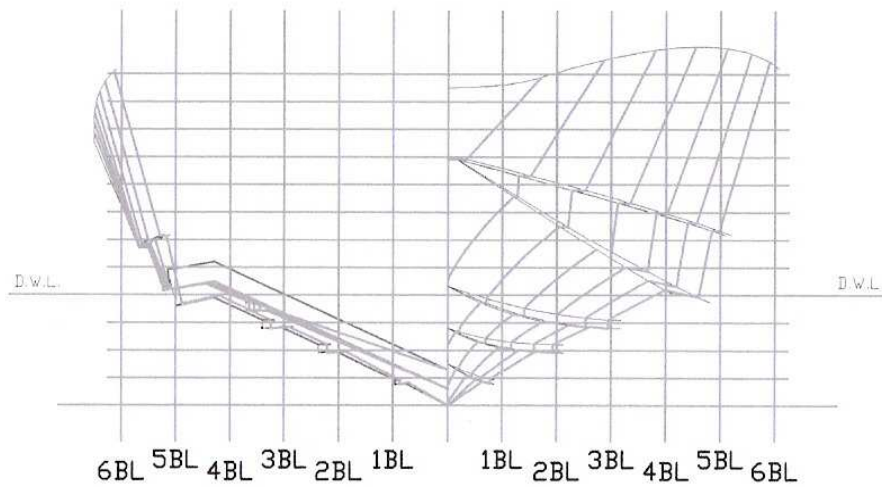
대상선박의 주요치수는 Table 3.1과 같이 최종 결정하였다.

**Table 3.1 Principal particulars of stepped hull**

LBP (m)	B (m)	D (m)	Engine power	Persons
7.25 m	2.6 m	0.95 m	230 ~ 240 hp	10명

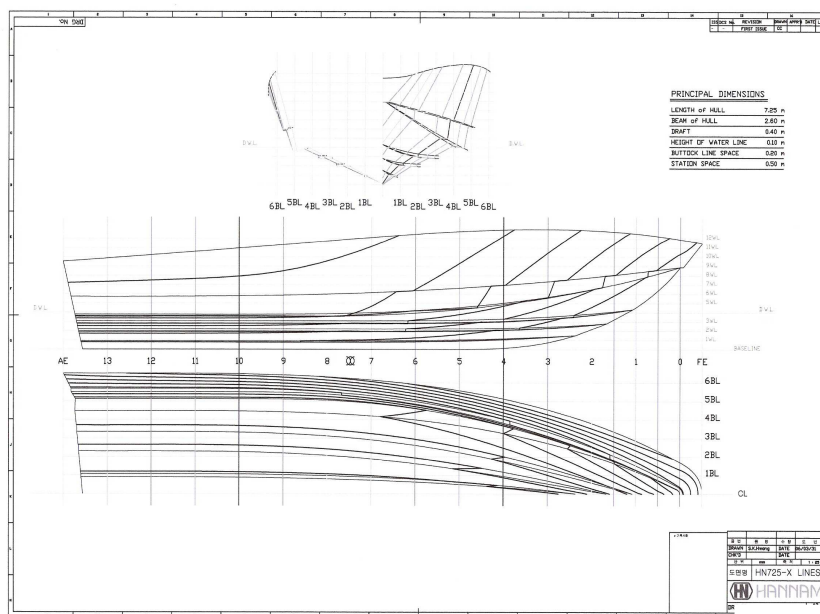
### 3.1.3 선형설계

고속 스텝 적용 선형은 파고 2.5m 이상의 파도상태에서도 안정적으로 운항될 수 있도록 깊은 V형상의 멀티 차인(multi chine)형을 채택하였고, 극심한 해상상태에서도 우수한 능파성(dry ride)을 위해 선수를 높은(ultra high sheer bow)타입으로 계획하였다. 대상선의 단면은 Savitsky, Tanaka가 제안한 선속 대응 선형분류 도표를 바탕으로 활주형상으로 결정하였으며, 단면형상은 고속영역에서 가장 유리한 직선단면의 활주형 선형으로 채택하였다. 또한, 선측파형 개선과 양력발생을 통한 저항감소를 위해 선저 좌우측에 삼각형 형상의 스프레이 레일을 3개씩 장착하였으며, 스텝 드라이브 추진이 적용 가능토록 충분한 선미 공간 확보 선형을 갖도록 선형선도를 작성하였다. Fig. 3.2는 선저 스텝 적용 레저보트의 정면선도이다.



**Fig. 3.2 Body plan of stepped hull**

한편, 스텝개수에 따른 최소저항 고속 활주형 레저보트 선형개발을 위한 저항특성 비교, 분석을 위하여 동일 직선 단면형상의 스텝이 없는(non-step) 선형과 1개 스텝(single-step)선형 및 2개 스텝(twin-step)선형 3개의 선형선도를 작성하여, Fig. 3.3~3.5에 나타내었다.



**Fig. 3.3 Lines of non-step hull**

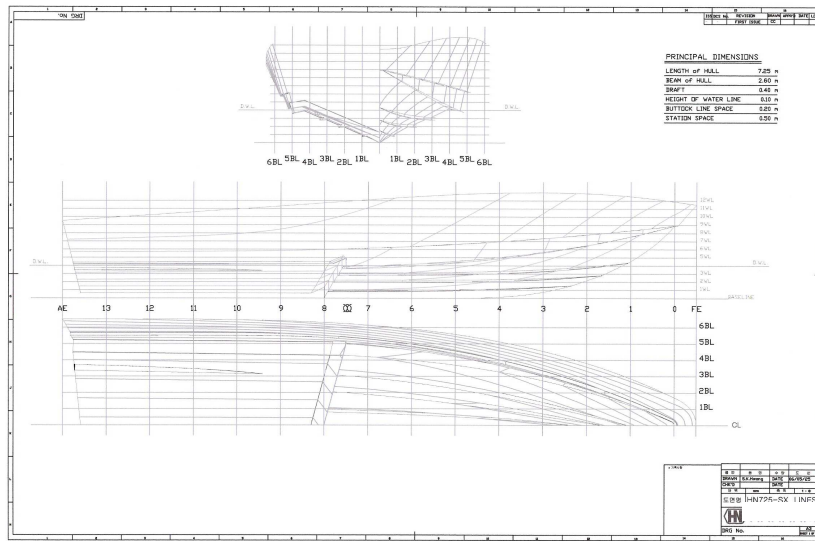


Fig. 3.4 Lines of single-step hull

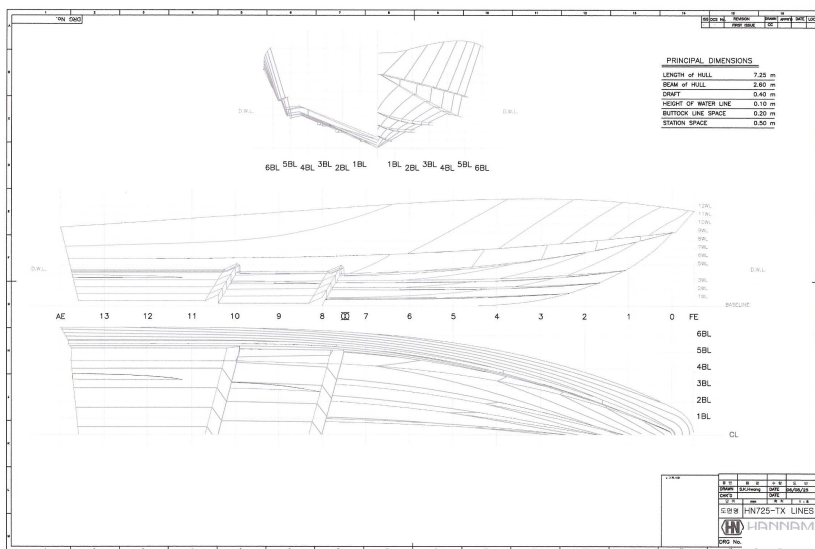


Fig. 3.5 Lines of twin-step hull

선저 스텝 적용 레저보트의 배수량( $\Delta$ ), 부심위치(KB), 침수표면적 등의 유체정역학적(hydrostatic) 제 계산은 Multisurf 프로그램을 이용하여 계산하였고, 유체동역학적(hydrodynamic)특성 계산은 MS-Excel 프로그램 작성된 Savitsky의 유체력 계산식(planing Formula)을 이용하였다.

### 3.2 횡동요 감소 보조동체 장착 레저보트

스텝 적용 선형은 일체형 선저선형에 비하여 적은 침수표면적으로 인해 저항의 감소와 이로 인한 연비 절감 효과를 얻을 수 있다. 그러나, 기존 스텝 적용 선형이 가지는 최대의 단점은 Fig. 3.6과 같이 고속 주행시 선미선저로 갈수록 좌우 접수면이 없어짐에 따라 작은 파도의 영향에도 선체가 민감하게 반응하여 횡방향 안정성이 극도로 나빠진다는 것이다.

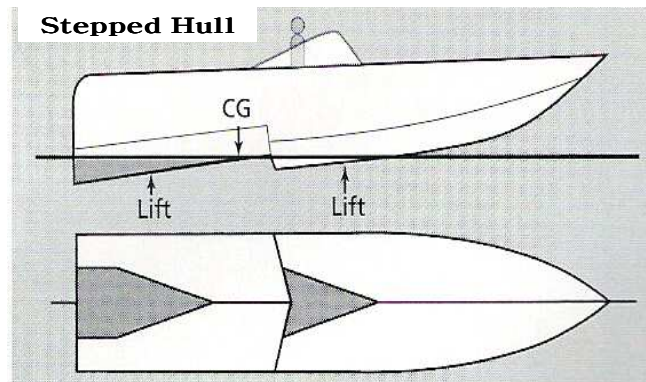


Fig. 3.6 Wetted area of stepped hull

이러한 문제점들은 Fig. 3.7과 같이 선미에 횡방향 안정성을 보정할 수 있는 선미 보조동체를 장착함으로써 해결할 수 있으며, 또한, 선측으로 파생되는 조파들을 선미에서 효과적으로 감쇠시킴으로 후미의 켈빈파(Kelvin wave)의 파고를 현저하게 낮출 수 있다는 장점을 가지고 있다.

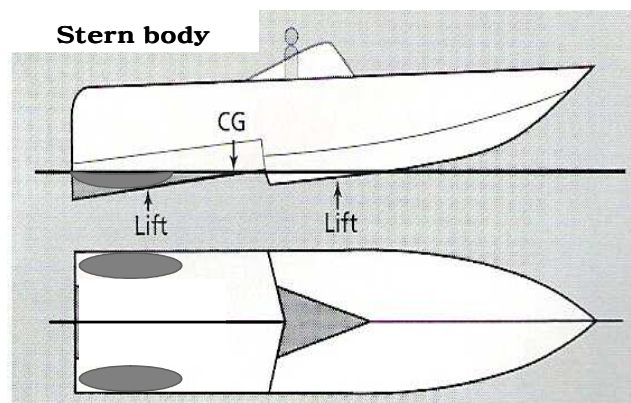


Fig. 3.7 Wetted area of stepped hull with stern planing body



### 3.2.1 횡동요 감소 보조동체 장착 선형특성

고속 주행시 스텝 적용 선형의 횡동요 성능을 안정적으로 구현할 수 있는 선형은 선미에 보조동체를 장착한 선형으로서, 선측으로 파생되는 조파들을 선미에서 효과적으로 감쇠시킬 수 있는 M-hull형의 단면을 기본형상으로 하고 있다.

#### (1) M-hull 주동체

M-hull 선형의 주동체(central displacement section)는 선체부분의 정유체력을 감당하고, 깊은 선저경사각의 원활한 선수형상과 얇은 선저경사각을 가지는 직선형의 수직 종단면선(buttock line)을 가지는 선미형상을 보이고 있다. Fig. 3.8은 M-hull 선형의 단면형상에서 주동체부를 나타낸 것이다.

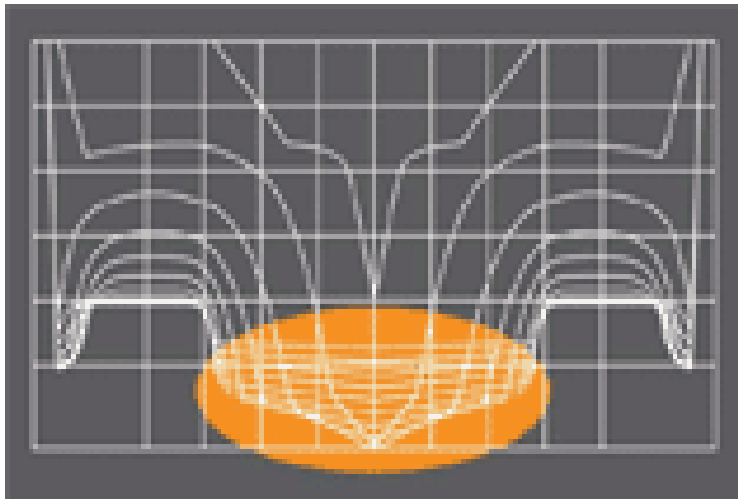
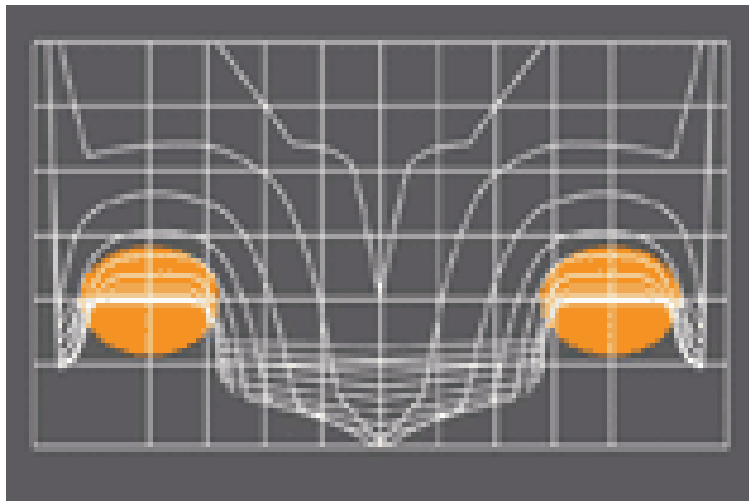


Fig. 3.8 Body plan of M-hull's main body

#### (2) M-hull 선미동체

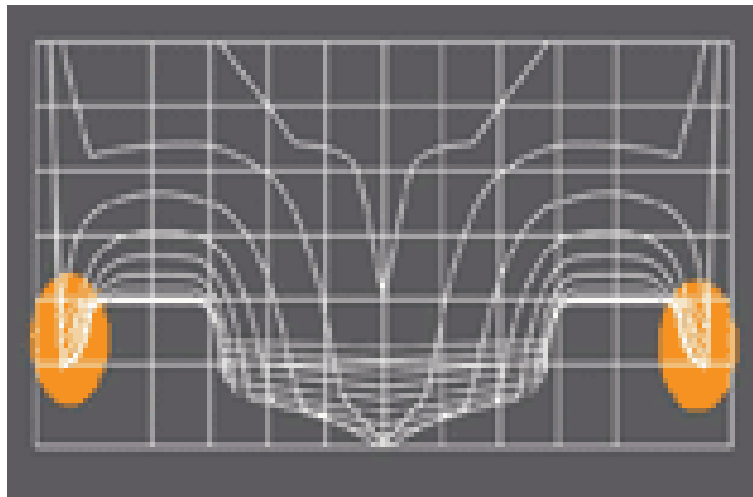
선체현측의 활주터널(planing tunnel)은 동역학(hydrodynamic)과 공기역학(aerodynamic)적 특성에 기인하는 양력(lift)를 발생시켜, 선박의 주행시에는 대부분 수면 위에 놓여진 상태에서 활주하게 된다. Fig. 3.9는 M-hull 선형 단면형상에서 선미 동체부를 나타낸 것이다.



*Fig. 3.9 Body plan of M-hull's planing tunnel*

### (3) 선미동체 스커트(Rigid Skirts)

선체현측의 스커트(rigid skirts)는 선체 밖으로 빠져 나가는 선수파도를 다시 안쪽으로 돌려놓음으로서 나선형의 활주터널(planing tunnel)을 생성시키고, 이로 인해 선수파의 에너지를 선미의 양력요소로 전환 시키는 기능을 가진다. Fig. 3.10은 M-hull 단면형상에서 스커트(skirts) 부분을 나타낸 것이다.



*Fig. 3.10 Body plan of M-hull's rigid skirts*

### 3.2.2 선형 개념정립

#### (1) 기본계획

국외 횡동요 성능을 안정적으로 구현할 수 있는 M-hull 단면형상을 가지는 실적선 자료조사, 분석 등을 토대로 선형개념을 정립하였다.

- 형 태 : 선저 스텝 적용 선형에 횡동요 감소 선미 보조동체 장착
- 용 도 : 횡방향 안정성 향상 고속 소형 레저보트
- 속 력 : 약 50knot(시운전 최대출력), 약 45knot(항해속력)
- 주 기 관 : 약 600 hp × 6000 rpm 이상
- 승 선 원 : 최대 12명

#### ① 선체규모

승선인원은 레저목적의 기능에 적합하게 조종자 및 승선 가능인원을 포함하여 최대 승선인원은 12명으로 계획하였으며, 승선원과 국내외 운용되고 있는 고속 레저보트 실적선을 바탕으로 선체길이는 8.5m급으로 결정하였다.

#### ② 속력

국내 해경, 해군 등에서 운항되고 있는 전장 8.5m급 활주형선은 최대선속은 50knot이지만, 고속시 안정성의 확보가 쉽지 않아 항해속도는 45knot 미만인 것으로 조사되었다. 이에, 고속 레저보트 운용 선주들의 요구 선속과 향후 수요조사 등을 고려하여 횡방향 안정성 향상 레저보트의 최대선속은 50knot 이상으로 설정하였다.

#### ③ 주기관

주기관은 대상선박의 규모와 선형 및 중량 등을 감안하여 최대선속 50knot 이상이 가능하여야 하므로, 이에 따른 추정값 및 기존 유사 선박의 선속별 주기관을 조사, 검토하여 마력은 최소 600 hp이상으로 프로펠러 회전수는 약 6,000rpm 이상을 고려하였다.

#### ④ 선체 재질

선체 재질은 고속성능을 고려하여 가벼우면서 파랑충격에 대한 충분한 구

조강도 특성을 가진 재료로서, 건조비용이 저렴하여야 할 뿐만 아니라 유지보수가 쉬워야 한다. 이런 관점에서 레저보트에 널리 사용되어온 F.R.P(fiberglass reinforced plastic)를 선체재질로 선정하였다.

## (2) 주요치수 선정

국의 스텝 적용 레저보트와 M-hull 단면형상의 실적선 20여척의 주요목 자료와 광범위한 인터넷상의 선박 시운전 성능시험 자료들을 수집하였다.

이 과정에서 고속성능의 극대화를 위하여 스텝 적용 선형을 선정하였으며, 고속에서 보다 완벽한 활주상태에서의 트림을 유지하는데 유리한 1개 스텝선형으로 계획하였다. 선체길이는 국외 실적선의 주요요목 범위, 선형특성 분석 및 승선가능 인원 배치 등을 고려하여 8.5m급을 결정하였다.

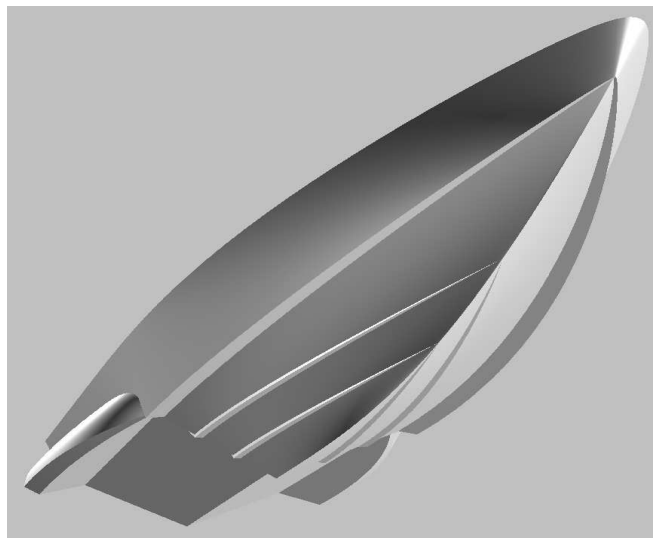
선체 깊이와 길이와의 관계는 선체 종강도에 큰 영향을 준다. 특히, 해상의 파랑하중에 따른 종강도를 고려하여 깊이를 산정하였고, 선수부 형상 및 높이는 높고 다소 넓은 형상으로 결정하였다. 고속 주행의 경우에서 가로방향 안정성을 극대화 할 수 있는 것은 중횡비가 큰 선형이다. 따라서 전체적으로 선체의 폭을 줄이면서 선미에 보조동체를 장착하는 것이 유리 할 것으로 판단하였다. 선미 보조동체의 형상은 스텝 적용 선형이 완전 부상상태에서 좌·우현으로 기울어졌을 경우를 시뮬레이션 하고, 기존의 소형 고속 활주형선 보다 좀 더 큰 측면 양력을 일으킬 수 있도록 하였다. 그 외 주요치수인 흘수는 조사되었던 선박들과 유사하였으나 배수량의 조정에 따라 미세하게 차이를 보였으며, 폭의 경우는 선미의 보조동체의 규모를 변경함에 따라 크게 차이를 보였다. 대상선의 배수량( $\Delta$ ), 부심위치(KB), 침수표면적 등의 유체정역학적(hydrostatic) 제 계산은 Multi-surf 프로그램을 이용하여 계산하였다. 상기의 검토를 토대로 대상선박의 주요치수는 Table 3.2와 같이 최종 결정하였다.

**Table 3.2 Principal particulars of stepped hull with stern body**

LBP (m)	B (m)	D (m)	Engine power	Persons
8.82 m	3.26 m	1.10 m	600 hp 이상	12명

### 3.2.3 선형설계

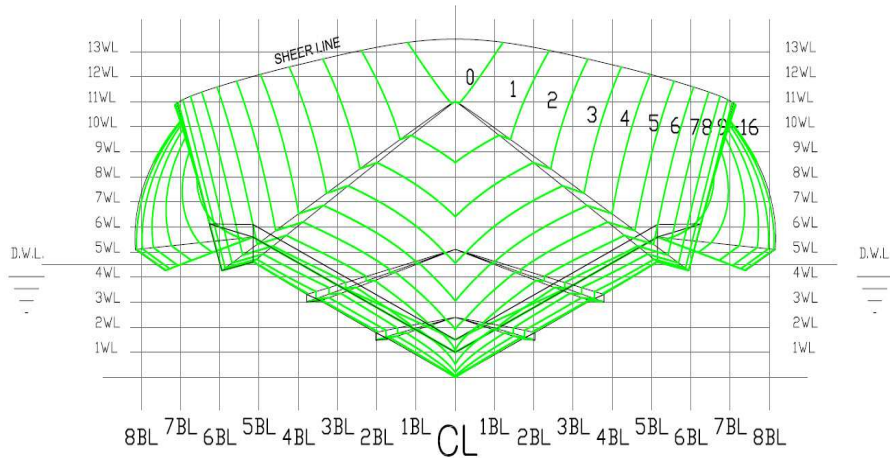
고속성능과 주행 안정성의 목적을 극대화 하고, 또한 건조의 편리성을 위하여 깊은 V형의 하드 차인(hard chain)형상을 기본개념으로 선미 스텝 뒤쪽으로 좌우 양현측으로 돌출되며, 작은 V형 타입의 선체형상으로 된 보조동체를 장착한 3D 개략도를 Fig. 3.11과 같이 작성하였다. 이러한 3D도면을 바탕으로 모델링하고 유체역학적인 제 계산을 통해 최초 계획배수량 및 주요사양과 주요요목에 맞도록 수정하고 양호한 유체정확적인 현상 도출 될 때까지 3D 개략도 및 모델링을 반복하였다. 이러한 반복 작업을 통하여 작성된 선도를 바탕으로 Savitsky의 유체력 계산식을 기초로 동역학적인 현상을 추정하기 위하여 목적달성에 문제가 없음을 확인하고 문제가 있으면 다시 최초의 선 수정 및 절차 반복, 또는 무게중심점의 변경 및 초기 트림 값 변경 등의 요소들을 변경함으로서 최적의 선형설계를 완료하였다. 이러한 작업 후 제반 항목을 종합 반영하여 선형선도를 작성하였다.



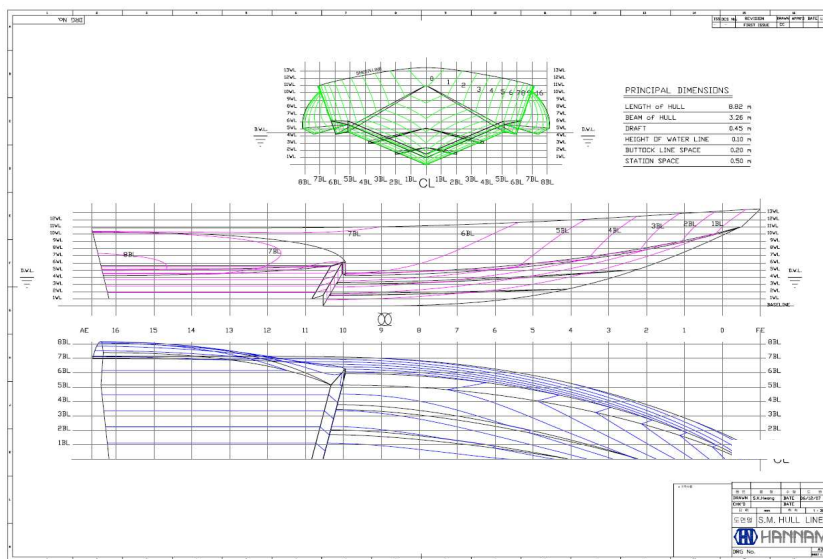
*Fig. 3.11 Schematic of the stern planing body*

대상선은 높은 파고의 해상상태에서도 원활하게 운항될 수 있도록 깊은 V형상의 멀티 차인형을 채택하고 극심한 해상상태에서도 우수한 능파성능을 위해서 높은 선수형상을 계획하였다. 또한, 단면형상은 고속상태에서의 저항

감소에 유리한 직선 단면형상으로 결정하였고, 양현측에 삼각형 단면의 2개의 스프레이 레일을 장착하였다. Fig. 3.12에 보조 선미동체 적용 활주형선의 정면선도(body plan)를, Fig. 3.13에 선형선도(lines)나타내었다.



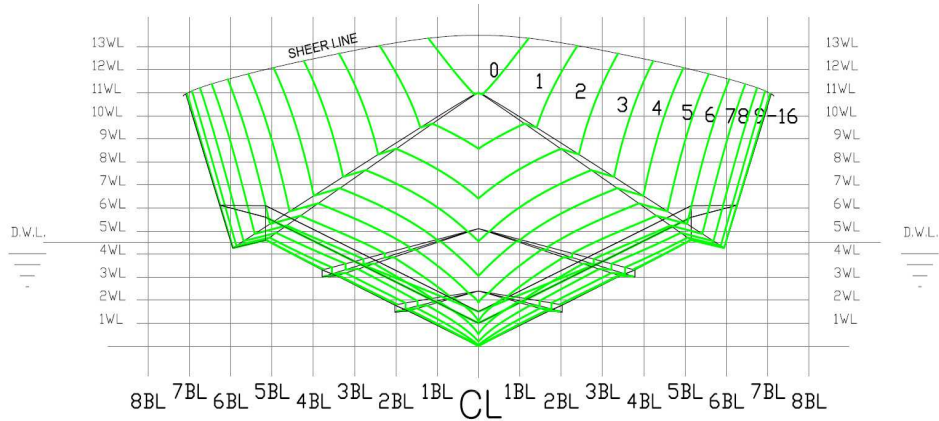
**Fig. 3.12 Body plan of stepped hull with stern body**



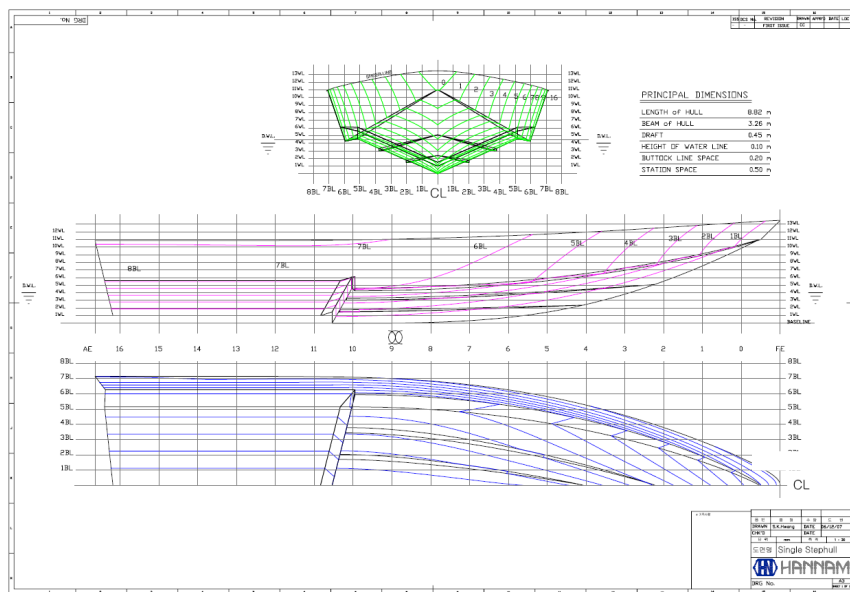
**Fig. 3.13 Lines of stepped hull with stern body**

또한, 선미 보조동체 적용 유무에 따른 운동특성 및 저항특성을 비교, 분석을 위하여 동일선형을 대상으로 선미 보조동체를 가지지 않는 선형의 선도를

작성하였으며, Fig. 3.14와 Fig. 3.15에 선미 보조동체를 가지지 않는 선형의 정면선도와 선형선도를 나타내었다.



**Fig. 3.14 Body plan of stepped hull without stern body**



**Fig. 3.15 Lines of stepped hull without stern body**

### 3.3 마찰저항 감소 선저공기공급 레저보트

마찰저항은 유체의 고유 특성인 점성으로 인하여 발생하는 현상으로서 침

수표면적을 감소시키는 것은 한계가 있기 때문에 선박의 마찰 저항감소에 대한 연구는 별다른 주목을 받지 못하였다. 하지만, 선박의 고속화와 운항 동력 절감에 의한 선박 운용 경제성 향상에 대한 요구가 점점 증대되면서 마찰저항 감소법을 실제 선박에 적용하기 위한 연구가 점차 활성화되고 있다[30].

본 절에서는 선저부분에 공기공급을 유도하여 미소기포 및 공기막을 형성시켜 경계층 유동변화에 따른 침수표면적 감소로 저항성능 향상 고속 활주형 레저보트 선형개발을 위하여 선형 개념정립과 선형설계를 수행하였다.

### 3.3.1 선저 공기공급선 선형특성

선체에 적용할 수 있는 마찰저항 감소법으로는 공기를 물체 주위 유동에 주입하여 마찰저항을 감소시키는 미소기포주입법(micro-bubble injection method)과 공기윤활법(air lubrication method)이 있다[31].

미소기포주입법은  $200 \sim 600 \mu m$  정도의 직경을 갖는 미소 기포(micro-bubble)를 경계층 내부로 주입시켜 미소기포가 난류 경계층 유동의 구조가 난류응력이 감소하는 방향으로 변화하여 국부적으로 마찰저항이 감소하는 현상을 이용한 방법이다. Fig. 3.16에 미소 기포주입법의 공기공급 선박의 개념도 나타내었다.

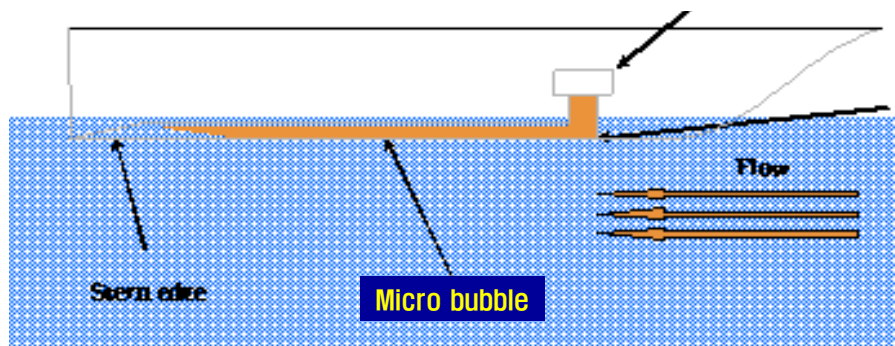


Fig. 3.16 Schematic diagram of air cavity and air bubble

공기윤활법은 물체 표면에 공기를 공급하여 물체 표면을 덮는 공기 막을 형성시켜 주는 방법이다. 공기 막으로 덮인 부분에서는 원래 액체와 접촉하고 있던 물체 표면이 공기와 접촉하게 되어 마찰저항이 감소하게 된다. 이를

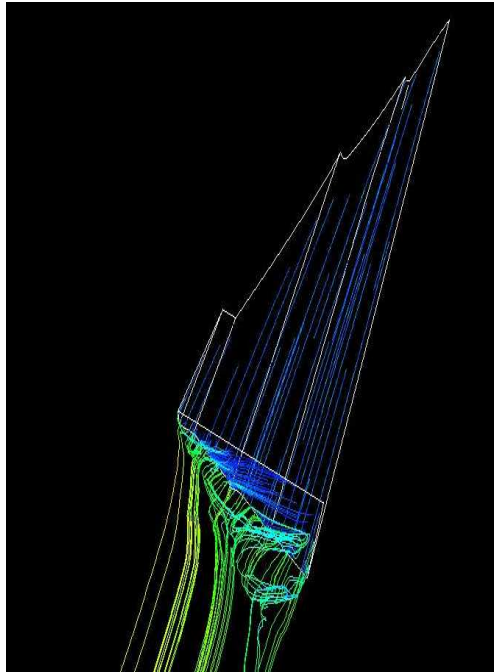


선박에 적용하는 경우에는 선박의 선저표면을 얇은 공기 막(air film)으로 덮어줌으로써 물에 잠겨있는 선체 표면의 일부분이 물 대신에 공기와 접촉하게 하고 이를 통하여 침수표면적이 감소하는 효과를 얻어서 선박의 마찰저항을 감소시키게 된다. 이러한 형태의 선박을 공기 유힬선이라고 부르기도 한다.

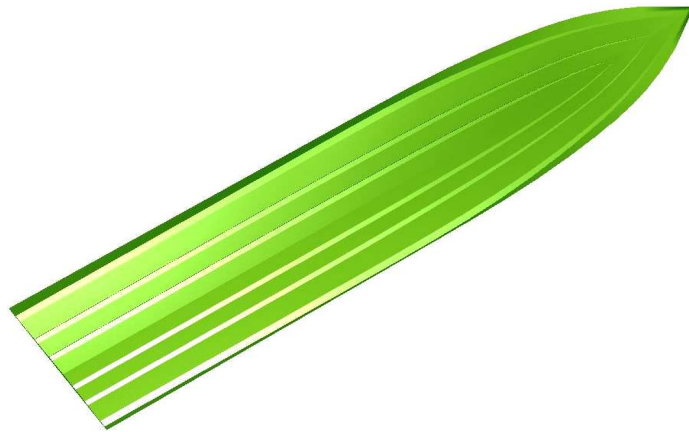
### 3.3.2 선형 개념정립

대상선에 적용된 공기공급법은 미소기포 주입법으로 선저 공기공급에 따른 다량의 미소 기포를 경계층 내부 벽면에 근접한 위치로 유입시키면서 미소기포가 효율적으로 생성되어 선미 접수면까지 지속될 수 있어야 한다.

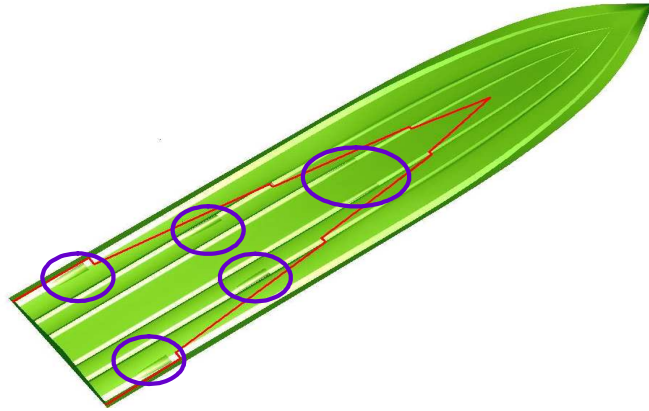
이에, 먼저 공기공급부의 위치는 유체가 흐르는 선저 접수면내에 위치되도록 하였고, 공급된 미소공기의 지속적인 진행을 위하여 스프레이 레일 사이를 오목하게 하였으며, 공기공급부 폭은 스프레이 레일 사이 간격의  $1/3$ 의 범위로 폭/길이비는 0.25로 고려하였다. 또한, 고속시 선저형상이 과도한 공기유량에 따른 형상저항 증가를 고려하여 선저 공기유입 공급부의 단 높이는 4cm로 결정하였다. Fig. 3.17은 전산유체역학(CFD) 프로그램(S/W)인 플런트(Fluent) 이용하여 선저 유체흐름을 분석한 결과이며, Fig. 3.18 ~ 3.19는 선저 공기공급 유무 선형의 공기공급부의 위치 및 형상을 나타낸 것이다.



*Fig. 3.17 Fluid flow of the hull bottom*



*Fig. 3.18 Bottom of the hull without air injection*



*Fig. 3.19 Bottom of the hull with air injection*

(1) 선체규모

승선인원은 조종자와 승선인원을 포함하여 최대 12여명 계획하였으며, 승선원과 선내 구획배치를 고려하여 선체길이는 약 9.5m급으로 결정하였다.

(2) 선 속

현재 국내에서 운항되고 있는 고속 활주형 레저보트의 선속은 기능별/규모별 차이는 있지만, 대부분 30knot 미만으로 운항되고 있어, 선저 공기공급 선형의 설계선속은 약 35knot 이상으로 설정하였다.

(3) 주기관

선저 공기공급 선형은 고속 활주형의 레저보트로서 주기관은 고속에서 높은 추진효율과 조종성능 등이 우수한 워터제트(water-jet engine)을 주기관으로 사용하였다. 이에, 주기관의 마력은 국내외 실적선의 선형규모, 선계선속 및 탑승인원 등을 고려하여 대략 450마력(hp) 정도로 계획하였다.

(4) 선체 재질

선체 재질은 고속성능을 고려하여 가볍고 파랑충격에 대한 충분한 구조강도 가져야 하며, 건조비용이 저렴하여야 할 뿐만 아니라 유지보수가 쉬워야 한다. 이런 관점에서 개발대상 공기공급 선형의 선질은 F.R.P로 결정하였다.

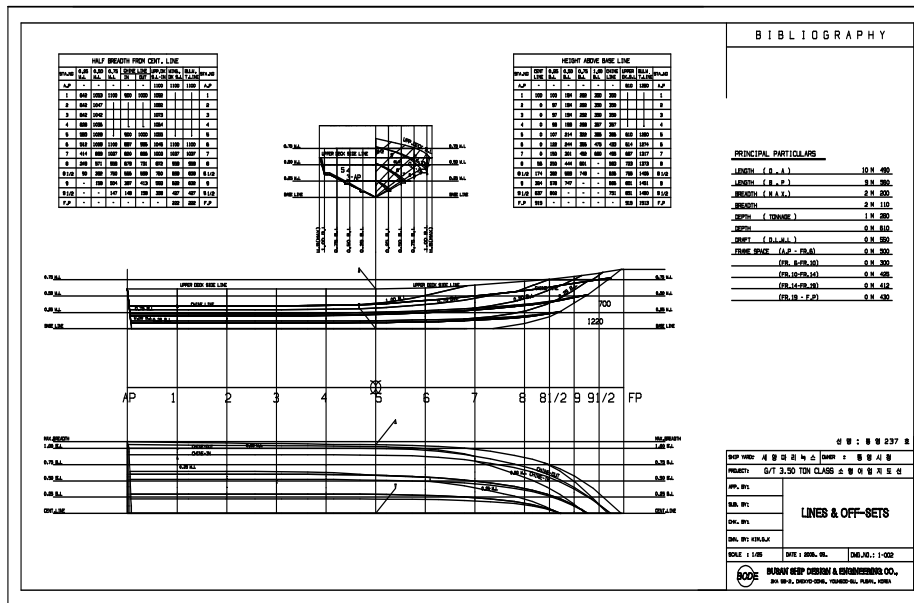
Table 3.3에 9m급 선저 공기공급 레저보트 선형의 주요치수를 나타내었다.

*Table 3.3 Principal particulars of planing hull with air injection*

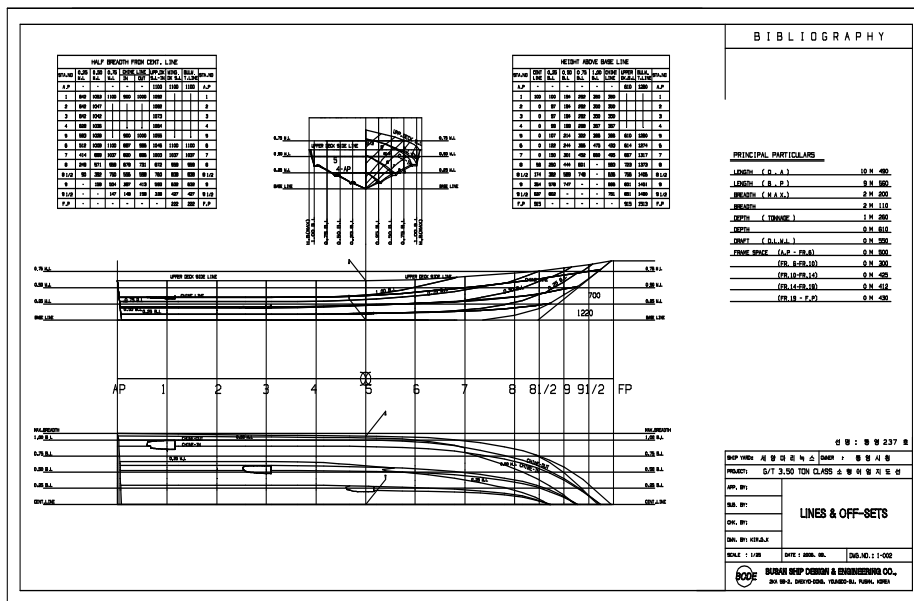
Items	Principal dimension	Items	Principal dimension
LBP	9.63 m	Breadth	2.20 m
Depth	1.20 m	Draft	0.50 m
Main engine	450 hp × 1 대	Design speed	abt. 35 knot

### 3.3.3 선형설계

선저 공기공급 레저보트 선형은 고속 활주형 선형으로서 고속상태에서의 저항감소와 파랑중 충격하중 감소를 위하여 직선 단면형상을 채택하였고, 삼각형 단면의 스프레이 레일을 선저 좌·우현에 각각 2개 부착하였으며, 선저에 난류 경계층 유동에 변화에 따른 난류응력(마찰저항) 감소를 위해 선체길이 방향으로 스프레이 레일 사이에 좌·우현 각각 3개의 공기공급부를 설치하였다. Fig. 3.20 ~ 3.21에 선저 공기공급 유무 레저보트 선형의 선형선도(lines)를 나타내었다.



*Fig. 3.20 Lines of the hull without air injection*



*Fig. 3.21 Lines of the hull with air injection*

## 제 4 장 실험역 모형시험기법 정립

정상상태로 항주하는 고속 활주형선은 배수량형 선박인 경우와는 달리 커다란 동적압력이 작용하고, 그것이 선체를 부상시켜 저항이 감소하게 되어 고속으로 항주하는 것이 가능하게 된다. 이때 작용하는 동적인 압력은 선체를 부상시키는 것만이 아니라, 트림을 발생하게 하여 항주자세의 변화를 일으키며 그 결과로 저항성능에 커다란 영향을 주게 된다. 이에 따라 고속 활주형선에 작용하는 저항은 항주자세에 따라서 크게 변화하고, 그 자세는 선형뿐만이 아니라 선체 무게중심의 위치, 프로펠러 축각, 부가물 등 여러 가지 복잡한 요소에 의하여 변화하는 것으로 알려져 있다[26].

또한, 활주형선과 같이 소형의 경량이며 고속으로 항주하는 단정에서는 성능 등의 검토는 실선을 사용해서 이루어지고 있는 일이 많으며, 건조가격 등의 이유로부터 모형시험을 하는 것은 드물다. 그러나 유체역학적 문제에 직면했을 때의 해결의 방법으로서 모형에 의한 선형시험이 최적의 선형검증법이 될 수 있으므로 고속 활주형선의 모형시험법을 정립 해 둘 필요가 있다.

고속수조에서 필요로 하는 수조의 기능을 열거한다면 고속 예인전차, 충분한 수조 길이, 단면적 특히 충분한 깊이, 조파장치, 감압장치 등이 있으며, 이들 조건을 모두 구비한 고속수조라면 가장 이상적이나 대부분의 문제가 예인전차의 속도 부족과 충분한 크기의 모형선을 사용할 수 없으며 수심 부족에 따른 천수영향 등의 심각한 문제를 일으키게 된다[27].

이에, 지금까지도 소형 고속 활주형선의 선형검증은 거의 대부분이 실선에 의한 해상시험 위주로 수행되고 있고, 설계에서 감성이 중요하게 되는 소형 고속 활주형선의 성능 연구에 실선 실험을 하여야 한다는 것은 무의미해 보이므로, 객관적으로 성능을 평가할 수 있는 시험방법, 계측데이터의 취득과 해석기법을 해결하는 고속 활주형선의 선형개발, 안전성 확보 등을 위한 새로운 평가방법 연구가 절실한 실정이다.

본 장에서는 건조 이전의 초기 설계단계에서 선수미 선형개선 및 부가물 부착 등에 따른 고속 활주형선의 주요성능을 객관적이며, 정성적으로 비교, 평가할 수 있는 방법의 하나로 실험역 모형시험기법을 정립하였다.

#### 4.1 고속 활주형선의 모형시험법 특징

고속 활주형선의 모형시험은 배수량선형의 시험법과는 다른 점이 많기 때문에 ITTC에서는 별도의 위원회를 두고 세계선형시험수조의 지침서가 되는 보고서를 정례적으로 발간하고 있다. 고속 활주형선 모형시험의 문제점으로는 Froude 수가 크기 때문에 기존 예인전차로서는 예인속도가 부족하여, 모형선을 작게 만들어야 하고 측벽이나 수조 깊이에 따르는 천수영향이 나타난다는 점, 그리고 배수량 선형과는 달리 주행 중에 자세변화가 크게 나타나고 그 영향이 저항특성에 크게 영향을 주게 된다는 점, 그리고 자세의 변화에 따라서 침수표면의 형상이나 침수표면적이 크게 변화하게 되어 마찰저항을 추정하는 것도 곤란하다는 등의 다양한 문제점들이 지적되고 있다.

달리 말하면, 고속 활주형선의 모형시험의 특징은 일반 배수량형 선박과 비교해서 동적인 부력에 의하여 배의 중량이 받쳐지게 되기 때문에 항주속도에 따라 주행자세(트림, 부상량) 변화가 커서 침수면적의 변화도 크고, 배의 중심의 전후위치를 변형(트림 변경)하는 것에 의하여 항주자세의 변화는 선박의 성능과 밀접하게 관계하고 있다[28].

Froude 수에 따라 예인전차의 속도를 높여주기 위해서는 대단히 긴 선형시험수조가 필요하게 되며, 모형선의 크기를 작게 할 수 있다면 시험 중에 Froude 수를 높여주는 것이 가능하다. Tanaka[27] 등은 일본의 국내에서 각각의 수조에서 길이가 0.4~4.0m에 이르는 상사모형선의 저항시험을 행하고 그 결과를 조사하여 1m 이하의 모형선인 경우에는 항주 트림각에 축척영향이 크게 나타나고 부상량에서는 별다른 변화가 없다는 결론을 얻은 바 있다.

고속 활주형선의 저항시험방법에는 크게 모형선을 검력계에 취부하고 항주자세를 여러 가지로 바꾸어서 힘이나 모멘트를 계측하는 구속시험과 추력선상을 추력방향으로 자동적으로 예향하는 자유 항주시험으로 나누어지며, 구속시험은 구속항목이 많을수록 검력계의 분력의 수가 많이 필요하고, 계측주행도 많아지는 특징이 있으며, 자유 항주시험은 실제의 주행상태를 직접 실현해버리므로 실험효율도 좋고, 성능확인 시험에는 유효하나, 추(weight)를 이용해서 초기 트림계측 시험 등을 동시에 수행하는 일이 많다[28].

고속 활주형선의 수조시험 결과로부터 실선의 성능을 예측하는데 방법은

배수량형 선박과는 달리 확립이 되어 있지 않은 실정이며, 고속 활주형선의 선형조파저항 이론계산과 저항시험 결과 해석의 최대 문제점은 고속 활주형선의 침수표면적을 어떻게 결정하는가 하는 문제이다. 이는 배수량선형은 길이방향(진행방향)상의 투영면적을 침수면적으로 하고 있는데 반해 고속 활주형선은 항주자세가 변화에 따른 침수표면적의 변화로 선속에 따른 마찰저항을 추정하는 것이 곤란해지는 불합리한 면이 존재한다.

## 4.2 실험역 모형시험법

고속 활주형선의 건조 이전 설계단계에서 주요성능을 객관적이고 정성적으로 비교, 평가할 수 있는 시험방법의 하나로 실험역 모형시험기법을 정립하였다.

### 4.2.1 실험역 모형시험기법 정립

고속 활주형선의 선형검증에 사용된 실험역 모형시험기법 정립은 총 15회 반복적인 예행 해상모형시험을 통한 시행착오(trial error)를 걸쳐 개선사항들을 반복으로 도출하여 정립하였다.

#### ① 시험예인선 선정

시험 예인선에 부착하는 가이드는 예인선의 선수부의 형상에 따라 지지방식이 달라지기 때문에 장착을 위해서는 많은 시간이 소비되었다. 이에, 모형시험 중 예인선의 선수부가 영향을 미치는 않는 선속 20knot 이상의 선형과 가이드 장착이 용이한 선수 핸드레일 없고, 선수갑판이 넓은 선형, 데이터 획득시스템 거취 공간이 가능할 수 있는 최적 예인선을 선정하였다.

#### ② 모형선 예인방법

초기에는 선저 선형변화에 따른 동일 활주형선을 예인선 양쪽에 동시에 지지하여 동일한 시험조건에서 정성적인 성능을 비교, 검토하여 하였으나, 선속에 따른 예인선의 선수부상과 파랑의 충격에 따른 횡동요에 의해 양측에 지지된 모형선의 시험조건이(홀수변화) 서로 변하였고, 모형선 2척 예인에 따른 가이드 장착의 어려움이 심해 모형선 1척의 예인방법으로 변경하였다.



### ③ 가이드 외팔보 제작

2척 예인방법일 때는 가이드 설치시간이 측정시간의 상당한 부분을 차지하여 예인선 임대시간 지연과 비용증가 등의 문제가 발생하였지만, 1척의 예인방법에 따른 외팔보 적용으로 가이드 설치시간을 단축할 수 있었다.

### ④ 시험 전담요원 배치

실해역 모형시험 수행중 시험 전담요원인 승선원 4명(운전자 1명, 데이터 획득 1명, 가이드 조정 1명, 시험총괄 1명)의 배치는 예인선의 선수미 트림 방지와 예인선의 운동방지 등의 최적 시험조건을 고려하여 시험시작부터 종료까지 그 위치에 고정배치 시켜 시험을 수행하였다.

### ⑤ 항주자세

시험예인선은 선속 25knot 반활주형 연안선박으로서 선속에 따른 항주자세의 변화가 지지되어 있는 시험모형선의 시험상태에 영향을 미칠 수 있다. 이에 시험 전 시험선속별 예인선의 선속별 부상정도를 확인하여 모형선과 연결되는 와이어가 수평이 될 수 있도록 가이드 위치를 체크하였으며, 시험 중에는 예인선의 선속별 가이드의 높낮이를 조절하여 모형시험을 수행하였다.

## 4.2.2 시험시스템 및 계측장비

실해역 모형시험에 사용된 모형선의 크기와 계측장비 주요사양을 정리하면 다음과 같다.

- 모형선 크기 : 1.0 ~ 1.5m
- 예인 저항값 범위 : 50N 이하
- 모형선 선속 대응 실선 속도 : 10 ~ 60노트
- 실해역 저항시험 계측범위 : 0 ~ 50N
- 실해역 횡동요 및 종동요 계측범위 : 0 ~ 300deg/sec

실해역 모형시험에서 모형선의 예인방법으로 초기 계획한 2척 예인법과 1척 예인법의 개략도를 Fig. 4.1 ~ 4.2에 나타냈으며, 반복적인 예행 해상모형시험을 통해 정립한 단독 예인법의 배치도를 Fig. 4.3 ~ 4.4에 보인다. 또한, 실

해역 모형시험에 사용된 계측장비 세부항목을 Table 4.1에 정리하였으며, 계측장비와 데이터획득시스템의 구성도를 Fig. 4.5에 나타내었다.

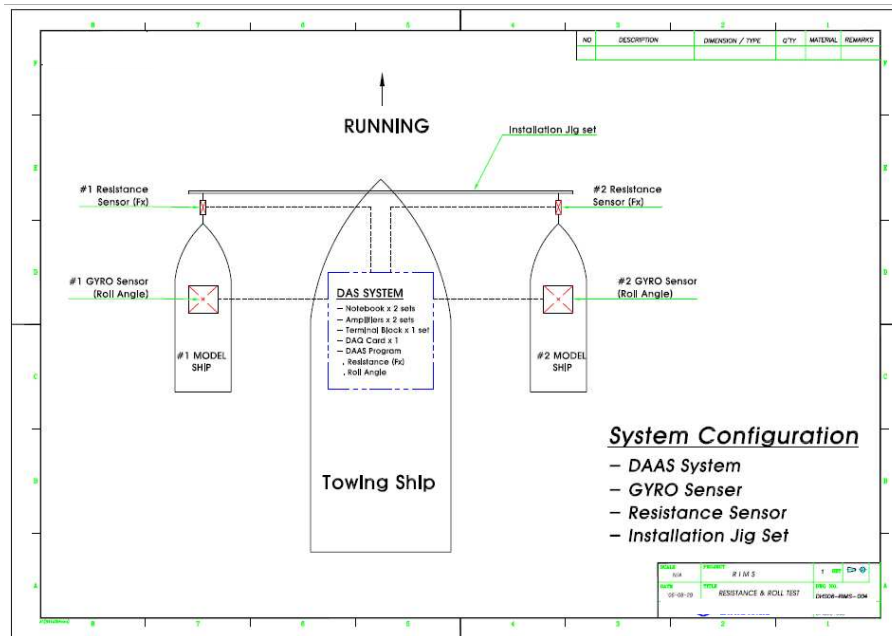


Fig. 4.1 Schematics of towing system (2 models)

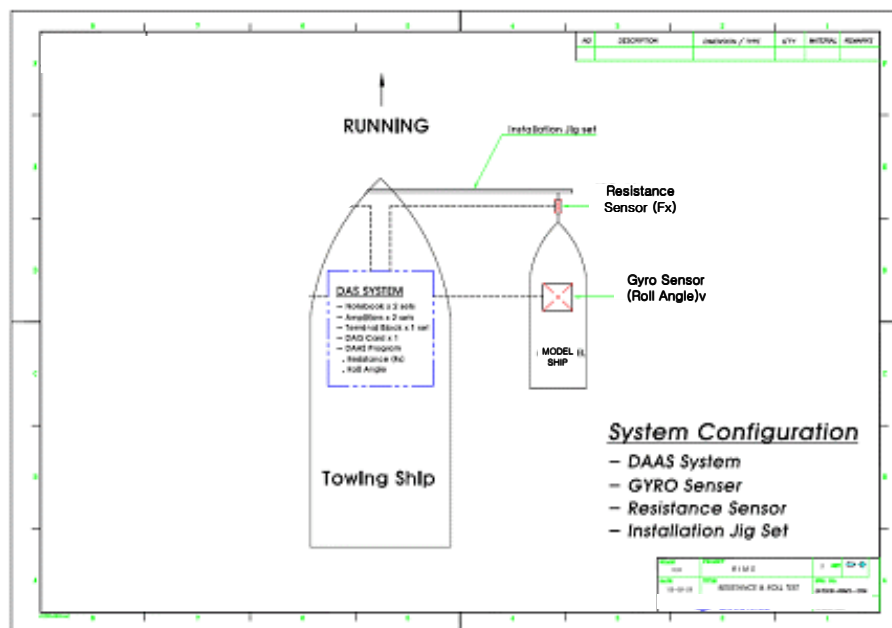


Fig. 4.2 Schematics of towing system (1 model)

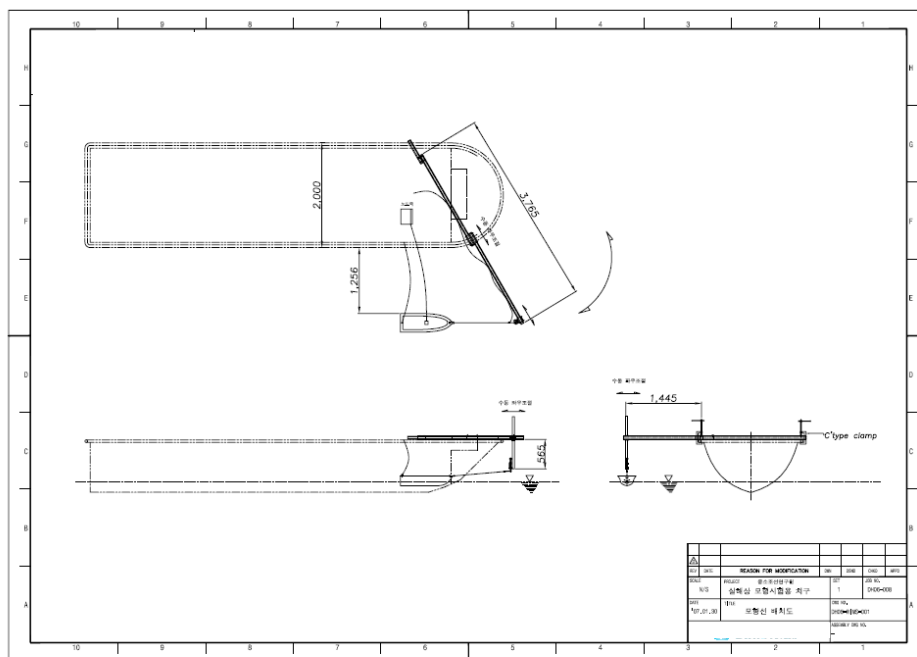


Fig. 4.3 Arrangement of towing system (1 model)

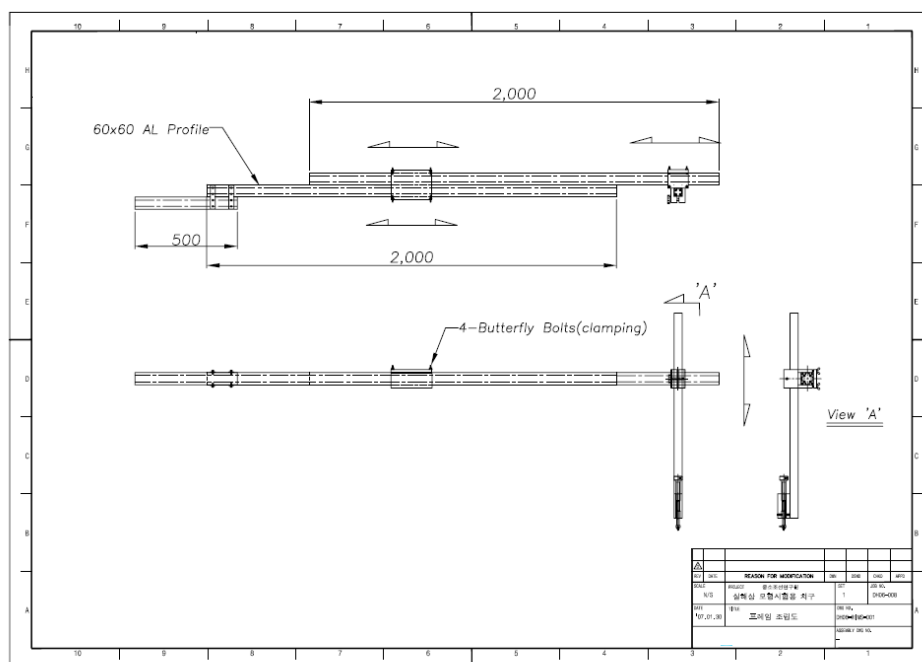


Fig. 4.4 A profile figure of support guide (1 model)

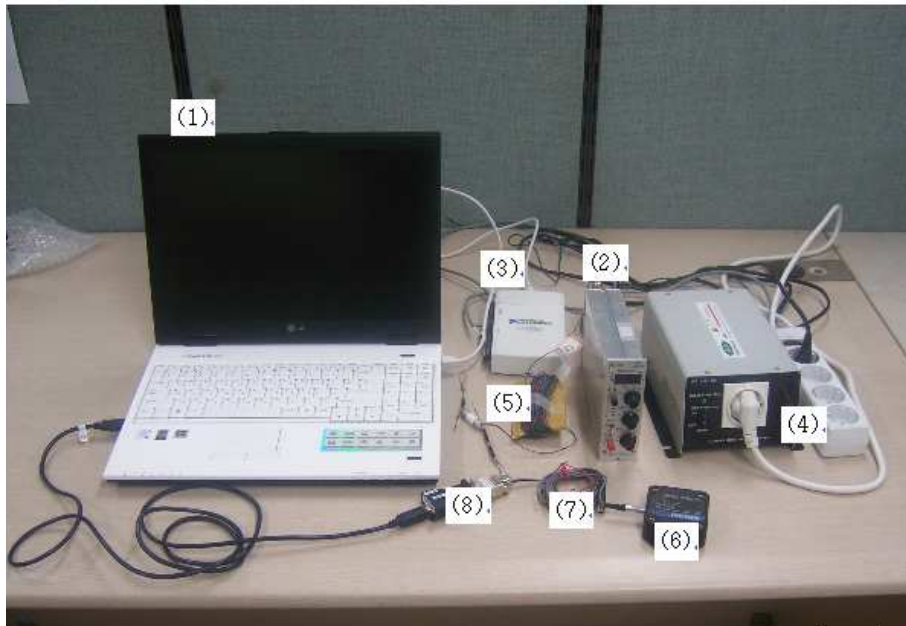









Fig. 4.5 Composition of data acquisition system

Table 4.1 Measuring equipment of at-sea model test

No	Equipments	Names of equipments	Function
(1)		Notebook	자료취득
(2)		DC signal Amplifier	발생한 전기신호를 증폭하여 식별 가능 신호로 변환
(3)		DAQ Card	증폭기에서 증폭된 신호를 컴퓨터가 인식 할 수 있도록 변환시키는 장치

No	Equipments	Names of equipments	Function
(4)		Inverter	-
(5)		Resistance Load Cell	저항센서는 일종의 저울 받는 힘을 전기 신호로 발생
(6)		Gyro Sensor	모형선 동요 전기신호 발생장치
(7)(8)		Gyro Sensor electric wiring	-

#### 4.2.3 저항시험결과 검증

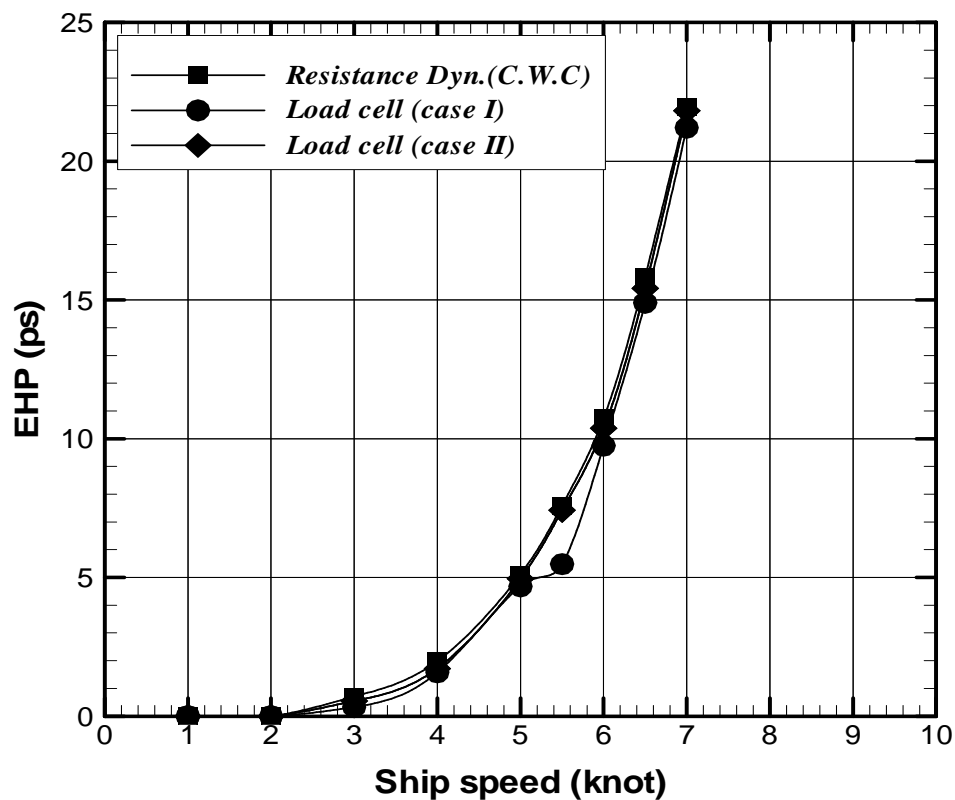
실해역 모형시험결과로서 계측된 시험값의 정도향상과 신뢰성을 확인하기 위하여 구명정을 대상으로 중소조선연구원 회류수조 저항계측기 결과값과 실험 모형시험에 사용될 로드 셀(load cell)의 저항계측 값을 상호 비교, 분석하였다. 회류수조와 실험 모형시험의 유효마력(EHP) 비교결과, 회류수조의 시험결과와 정성적으로 거의 동일한 경향을 보였으며, 정량적으로도  $\pm 2.5\%$ 이 내의 오차 범위를 보여 실험 모형시험을 통한 고속 활주형선의 선형시험 결과가 정성적으로는 충분히 신뢰성 있는 시험방법임을 확인할 수 있었다.

또한, 실험 모형시험에서의 로드 셀의 위치에 따른 시험결과 값의 정도는 모형선 선수부분보다는 고정 가이드 부근에 고정시키는 것이 정도향상을 위해서는 유리한 것으로 확인되었다. 해석방법은 Froude의 2차원법을 적용하

였으며, Table 4.2에 시험대상 구명정의 주요제원을 정리하였다. Fig. 4.6는 회류수조와 실효역 모형시험의 유효마력(EHP)결과이며, Table 4.3과 Fig. 4.7 ~ 4.8은 실효역 모형시험에 사용된 로드 셀의 검증결과이다.

**Table 4.2 Principal particulars of ship and model**

Item	Ship	Model
Scale	1/7.4375	
Lbp(m)	5.950	0.8000
Lwl(m)	5.929	0.7972
B(m)	2.650	0.3563
d (m)	0.838	0.1126
S (m <sup>2</sup> )	16.404	0.2965
▽(m <sup>3</sup> )	5.671	0.0138



**Fig. 4.6 Comparison of resistance result**

**Table 4.3 Calibration result of load cell (50N)**

Name		Underwater Tension meter		Model name		JHTM-50			
Indicator		HBM DK38S6		Serial No.		001			
Temp.	23℃	Humidity	60%	Load direction		Tension			
Client		—		Rated capacity		50N			
Load Load(N)	Average (mV/V)		Standard (mV/V)		Deviation (mV/V)		Measuring result		
	Load	Unload	Load	Unload	Load	Unload	Full Scale	0.52140	mV/V
0	0.00000	0.00006	0.00000		0.00000	-0.00006	N.L	0.05	% F.S
10	0.10447	0.10458	0.10428		0.00019	0.00030	H	0.06	% F.S
20	0.20874	0.20889	0.20856		0.00018	0.00033	R	0.03	% F.S
30	0.31310	0.31341	0.31284		0.00026	0.00057	C	—	% F.S
40	0.41734	0.41750	0.41712		0.00022	0.00038	Initial Zero	-0.18325	mV/V
50	0.52140	—	0.52140		—	—	Input Resistance	357	Ω
							Output Resistance	357	Ω
Zero stability			+0.10 % of F.S at 72hrs				Insulation Resistance	20	KMΩ
Remark	N.L: Non-linearity, H: Hysteresis, R: Repeatability						Inspector		Approval
Connector color code		Input + = RedⒶ      Output + = GreenⒷ <sup>ⓑ</sup> Input - = YellowⒸ      Output - = BlackⒹ <sup>ⓓ</sup>					Test Input voltage: 10V DC		

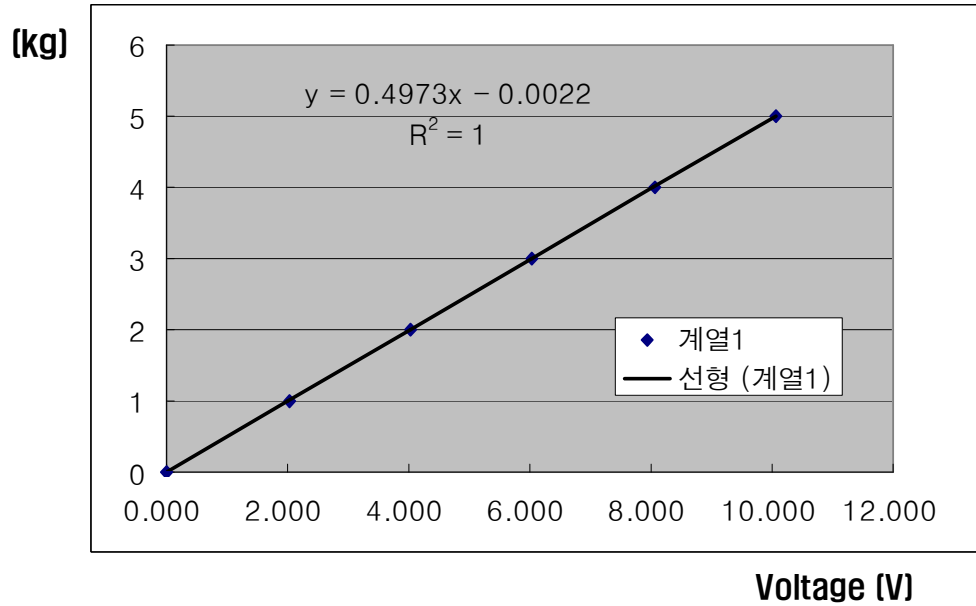
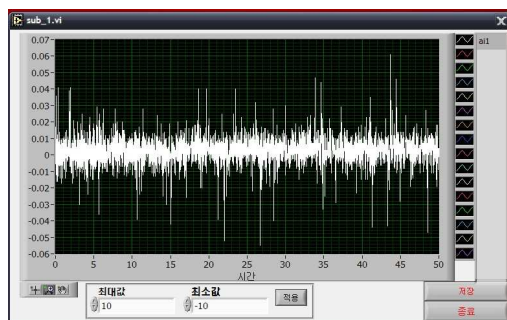


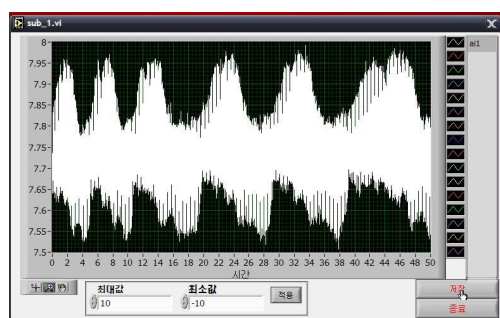
Fig. 4.7 Calibration formula of load cell (50N)



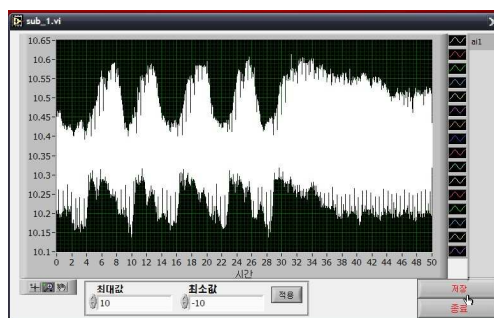
[weight : 0 kg]



[weight : 2.0 kg]



[weight : 4.0 kg]



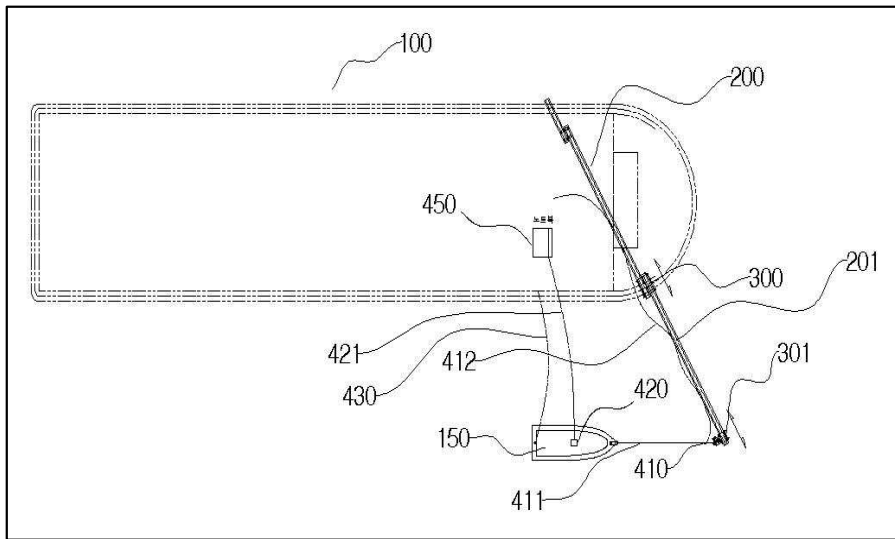
[weight : 5.0 kg]

Fig. 4.8 Input signal of voltage at each weight

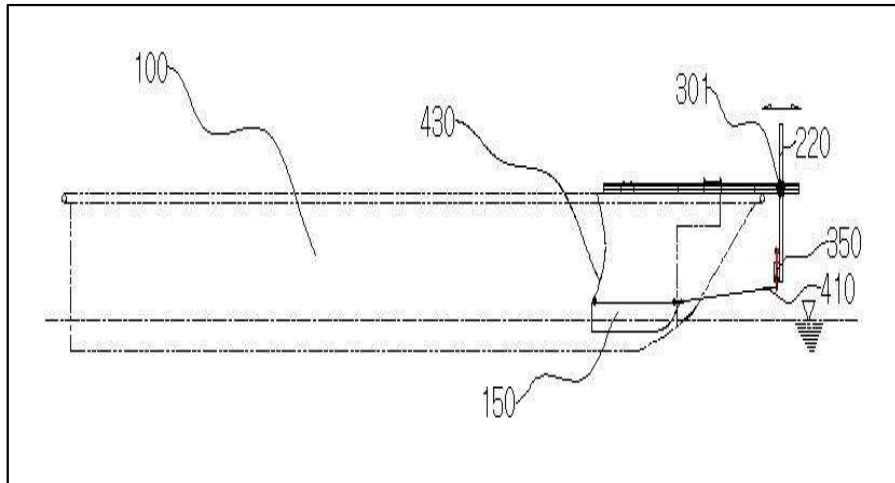


#### 4.2.4 시험방법

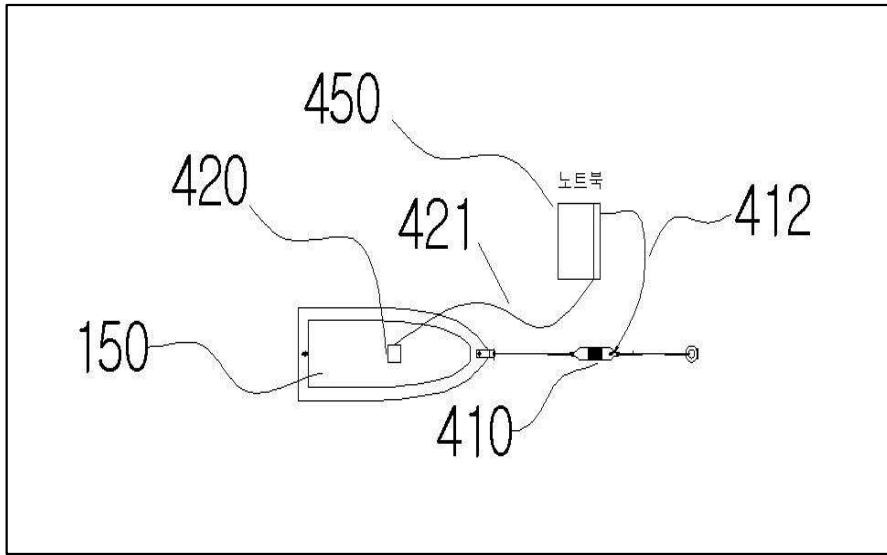
먼저, 실험해역 모형시험은 비교 대상선형을 예인선속이 동일하게 주행하도록 하고 시험선속별로 정확하게 그 반대방향으로 주행하는 왕복주행으로 주행 횟수는 최소 왕복 2회로 하였다. 가급적 주행은 바람을 선수방향과 반대 방향으로 한 상태로 실시하였고, 시험해역은 파도가 잔잔하며, 안정 운전상태를 얻을 수 있는 충분한 해역거리를 가지는 장소를 선택하였다.



(A plane arrangement)



(A profile arrangement)



(Model arrangement)

Fig. 4.9 General arrangement of at-sea model test

실해역 모형시험시스템은 Fig. 4.9와 같이, 예인선(100), 모형선(150), 저항계측 지원장비(410·411·412)들이 배치되어 예인선에 모형선을 고정하는 가이드(200·201·220)를 선수와의 간섭이 전혀 없는 선수전방까지 수평거치대 고정조인트(300·301·350)를 조절하여 고정시킨다. 수직방향 가이드는 선속별로 모형선과 연결된 와이어가 수평이 유지될 수 있도록 고정장치를 조절하여 예인위치에 고정시키고, 모형선 이탈을 방지할 수 있도록 고정와이어(430)를 모형선의 선미부에 설치한다.

시험준비가 끝나면 예인선의 속도는 정밀 GPS를 통하여 측정하여 시험선속으로 예인을 하면 가이드와 모형선 선수사이에 고정되어 있는 저항센서로부터 모형선에 걸리는 저항을 전기적 신호로 발생시킨다. 이 신호는 증폭기와 변환기를 통하여 무게단위로 환산되어 데이터획득시스템이 저장된 컴퓨터로 나타나며, 이 데이터를 정보들을 저장하여 선선별 모형시험 결과를 추정하게 된다. 모형선의 주행에 따른 운동성능 추정을 위해서는 자유도 계측 장치로 센서(420)를 모형선에 설치하면 된다.

#### 4.2.5 시험 해석방법

회류수조 시험과 실험역 모형시험은 Froude의 상사법칙에 따른 선속으로 수행되었으며, 해석방법은 1978 ITTC 해석법을 따르되 2차원법을 적용하였다. 실험역 모형시험 결과 해석방법을 요약하면 다음과 같다.

- Froude 해석법 ( $C_{TS} = C_{FS} + C_R + C_A + C_{AA}$ )
- 모형선 - 실선상관수정계수 ;  $C_A$  (1978 ITTC 해석법)
- 실선 공기저항계수 ;  $C_{AA}$
- 실선상태 : 15°C 해수 기준상태(회류수조), 수온측정(실험역 모형시험)  
파랑에 의한 부가저항은 고려치 않음

또한, 회류수조에서 계측한 항주시 시험대상 선박의 트림변화 및 침하량 계측을 위해 실선 속도별 선수침하량 및 트림변화를 계측하였으며, 해석방법을 요약하면 식(4.1)과 식(4.2)와 같다.

$$\text{○ 선수침하량(Sinkage) : } S = ((dA + dF) / 2) \times 2g / U^2 \quad (4.1)$$

$$\text{○ 선수트림(Trim) : } t = (dA - dF) \times 2g / U^2 \quad (4.2)$$

한편, 모형시험 결과를 실선으로 확장하는 방법은 일정한 축척비  $\lambda$ 로 만들어진 모형선을 사용하여 실선의 속도에 대응하는 Froude 수와 모형선의 Froude 수가 같은 속도 범위에서 전 저항  $R_{TM}$ 을 계측하고, 이로부터 식(4.3)과 같이 모형선 전저항계수  $C_{TM}$ 을 구할 수 있다.

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{0.5\rho_M V_M^2 S_M} \quad (4.3)$$

그리고, ITTC(1957)에서 제안한 모형선의 마찰저항계수  $C_{FM}$ 는 식(4.4)와 같이 계산되어 진다.

$$C_{FM} = \frac{0.075}{(\log_{10} Rn - 2)^2} \quad (4.4)$$

모형선의 잉여저항 계수  $C_{RM}$ 는 다음 식(4.5)으로 구할 수 있다.

$$C_{RM} = C_{TM} - C_{FM} \quad (4.5)$$

모형선의 Froude 수와 같은 실선의 Froude 수에서는 모형선과 실선의 잉여저항 계수  $C_{RS}$ 는 식(4.6)과 같다. 즉,

$$C_{RS} = C_{RM} \quad (4.6)$$

실선의 전 저항계수  $C_{TS}$ 는 식(4.7)에 의해 구한다.

$$C_{TS} = C_{FS} + C_{RS} + C_A + C_{AA} \quad (4.7)$$

여기서, 모형선-실선의 상관수정계수  $C_A$ 은 ITTC(1978 해석법)에서 제안한 식(4.8)을 사용하여 시험대상선의 실선확장 해석을 수행하였다.

$$C_A = [105(\frac{k_S}{L_{WL}})^{1/3} - 0.64] \times 10^{-3} \quad (4.8)$$

여기서,  $k_S$ 는 50mm 길이에 걸쳐 표면 거칠기의 평균높이를 의미하며, 값을 모를 경우에는  $150 \times 10^{-6} \text{m}$ 를 사용하기를 권장한다.

실선의 공기저항계수  $C_{AA}$ 는 식(4.9)와 같다.

$$C_{AA} = 0.001(\frac{A_{VT}}{S}) \quad (4.9)$$

여기서,  $A_{VT}$ 는 흡수선 위 공기에 노출된 선박의 가로 투영면적이고  $S$ 는 선체 침수표면적이다. 최종적으로 실선의 저항  $R_{TS}$ 는 식(4.10)로 주어지게 된다.

$$R_{TS} = (0.5 \rho_S S_S V_S^2) C_{TS} \quad (4.10)$$

## 제 5 장 고속 활주형선 선형시험 및 검증

### 5.1 선저 Step개수에 따른 활주형선 저항특성 비교

본 절에서는 스텝개수에 따른 최소저항 고속 활주형선 선형개발을 위하여 동일 배수량을 갖는 동일선형을 대상으로 회류수조와 실험해역 모형시험을 이용하여 non-step선형, single-step선형 및 twin-step선형에 대한 저항특성을 비교, 평가하였다.

#### 5.1.1 대상모형

실선 대응 모형선의 축척비(Scale Ratio)는 1/7.25 비율이며, 모형선은 FRP와 목재로서 제작하였다. 실험해역 모형시험에 사용된 3가지 선형의 정면선도는 Fig. 5.1, 주요제원은 Table 5.1에 정리하였고, 3가지 모형선의 형상을 Fig. 5.2에 나타내었다.

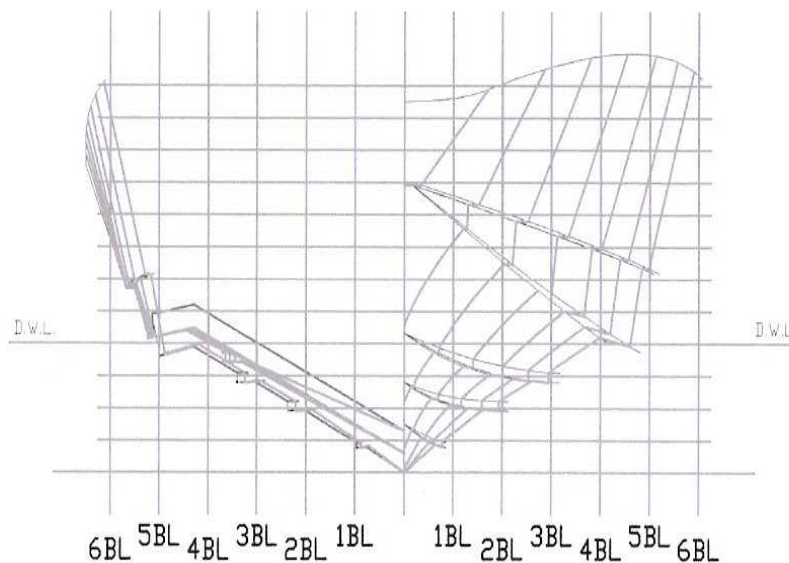


Fig. 5.1 Body plan of stepped hull

**Table 5.1 Principal particulars of ship and model**

Items	Non-step hull		Single-Step hull		Twin-step hull	
	Ship	Model	Ship	Model	Ship	Model
Lbp (m)	7.250	1.000	7.250	1.000	7.250	1.000
Lwl (m)	6.202	0.855	6.346	0.875	6.334	0.874
B (m)	2.600	0.359	2.600	0.359	2.600	0.359
d (m)	0.401	0.0553	0.442	0.0610	0.430	0.0593
S (m <sup>2</sup> )	11.97	0.228	12.14	0.231	11.90	0.226
▽(m <sup>3</sup> )	1.75	0.0046	1.75	0.0046	1.75	0.0046
LCB(%Lwl)	62.19		58.13		59.04	
LCF(%Lwl)	60.78		59.82		59.37	

### 5.1.2 시험방법 및 결과 고찰

회류수조 저항시험은 모형선을 선수회전(Yaw)과 좌우(Sway)가 제한된 상태에서 저항동력계 로드 셀(load cell)로 모형선을 무게중심(L.C.G) 위치에 고정하여 유속에 따른 저항치를 계측하였다. 실험역 모형시험은 예인선에 취부된 가이드(guide)와 모형선의 선수 맨 앞쪽을 예인줄로 연결하여 예인줄 사이에 수중장력계 로드 셀(load cell)를 부착시켰고, 모형선의 선수회전(yaw)과 좌우(sway)가 자유로운 상태에서 실선선속 20 ~ 50knot까지의 모형선의 저항치를 계측하였다. Fig. 5.6 ~ 5.11과 Fig. 5.18 ~ 5.20에 회류수조와 실험역 모형시험 모습을 각각 보였다.

저항시험 결과로서 계측된 Fig. 5.3의 non-step, single-step 및 twin-step선형의 침하량 곡선은  $Fn_{\nabla}$  0.3근처에서는 증가하다가, 선속이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있으며, 양력발생으로 저항이 점차로 감소된다는 것을 추정할 수 있다. 또한, Fig. 5.3의 트림변화는 twin선형이 선미트림 변화가 크지 않아 활주정도가 가장 양호한 선형임을 확인하였다. 시험결과, 전저항계수는 선속이 증가할수록 저항이 감소되고 있으며, non-step선형은 전체 속도구간에서도 single과 twin선형에 비해서 저항증가 현상을 보이고 있고, twin이

single선형에 비해 선속이 증가할수록 현저하지는 않지만 저항이 감소하는 것으로 계측되었다. 유효마력(EHP)곡선은 시험선속에서 non-step이 single와 twin에 비해 소요마력 증가를 보이고 있다. 설계선속 35knot(약  $F_n \nabla = 5.3$ )에서는 twin선형이 non-step선형에 비해서는 약 7.4% 정도의 소요마력 감소율을, single선형에 비해서는 약 3.7% 정도의 소요마력 감소율을 보이고 있다.

이는, 스텝을 설치하게 되면 고속 주행상태에서 공기유입에 따른 선저부분의 공동현상으로 침수표면적을 감소시켜 마찰저항 감소에 따른 연비절감 효과가 나타나는데, 저속에서는 스텝에 따른 형상저항의 증가로 single와 twin 선형이 non-step선형에 비해서 저항증가를 보이지만, 고속에서는 스텝선형이 non-step선형에 비해서 선저 양력발생에 따른 최의 선수 유효양각과 주행 트림각을 유지시켜 주고, twin이 single선형에 비해 선저 공기유입에 따른 선저 접수면(침수표면적) 감소효과를 조금 더 발생시켜 마찰저항 감소에 따른 소요마력 감소율이 조금 더 크게 나타난 것으로 판단된다.

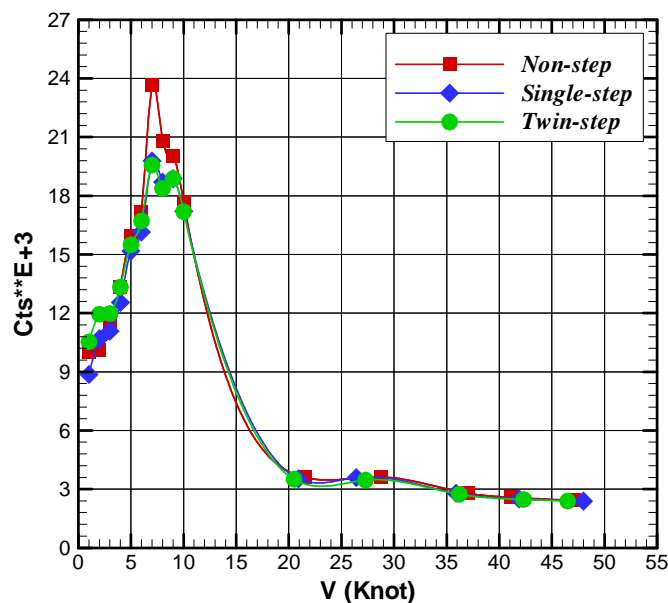


Fig. 5.16 Comparison of  $C_{ts}$  for ships (ship speed)

## 5.2 선미 보조동체 활주형선 운동특성 및 저항특성 비교

본 절에서는 고속 주행시 횡동요 감소 stepped hull 레저보트의 선형개발을 위하여 동일 배수량의 선미 보조동체(stern planing body) 장착 선형과 가지지 않는 2척의 동일선형을 대상으로 실험역 모형시험을 이용하여 운동특성 및 저항특성 비교, 검토하였다.

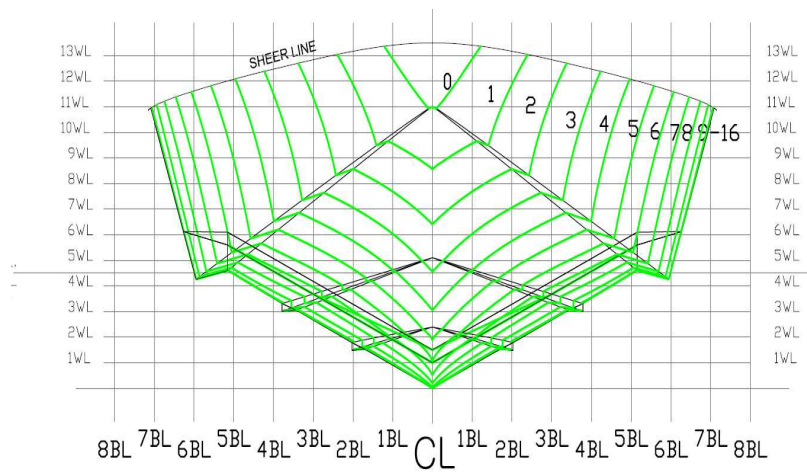
### 5.2.1 대상모형

실험역 모형시험에 사용된 모형선의 축척비(scale ratio)는 1/8.82 비율이며, 모형선 재질은 FRP와 목재로서 가볍게 제작하였다. 선미 보조동체 적용 선형과 가지지 않는 레저보트 선형의 실선 대응 모형선의 주요제원을 Table 5.3에 정리하였고, 정면선도(body plan)를 Fig. 5.24 ~ 5.25에, 선미 보조동체 적용 유무 모형선의 모습을 Fig. 5.26에 보였다.

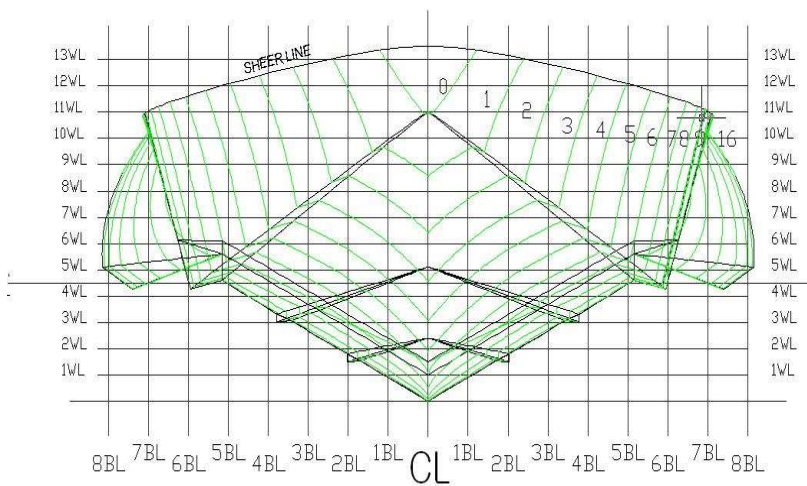
**Table 5.3 Principal particulars of ship and model**

Items	Stern planing body (w/o)		Stern planing body (w/ )	
	Ship	Model	Ship	Model
Loa (m)	8.820	1.000	8.820	1.000
Lwl (m)	6.885	0.781	6.885	0.781
B (m)	3.260	0.370	3.260	0.370
D (m)	1.100	0.124	1.100	0.124
d(m)	0.529	0.060	0.534	0.0605
S (m <sup>2</sup> )	16.570	0.213	16.70	0.2147
▽ (m <sup>3</sup> )	2.7925	0.00407	2.7925	0.00407





**Fig. 5.24** *Body plan of planing craft without stern planing body*



**Fig. 5.25** *Body plan of planing craft with stern planing body*

### 5.2.2 시험결과 고찰

선미 보조동체 적용 유무에 따른 고속 활주형선의 운동특성 및 저항특성 비교, 분석을 위해 실험역 모형시험을 수행하였다. 시험방법은 5.1절과 동일하며 본 시험대상선에는 자이로(gyro) 센서(sensor)를 모형선의 길이방향 중심(L.C.G)위치와 세로방향 중심(V.C.G)위치에 고정시켜 실선선속 20~52knot까지의 모형선의 동요 및 저항치를 계측하였다. Fig. 5.41~5.42에 실험역 모형시험 모습을 보였다.

Fig. 5.27~29의 모형선 저항계측치( $R_t$ )와 전 저항계수( $C_t$ )곡선에서 선미 보조동체 장착선형(w/ stern planing body)이 가지지 않는 선형(w/o stern planing body)에 비하여  $Fn_{\nabla}$  6.0까지는 저항증가율을 보이다가  $Fn_{\nabla}$  6.0이상의 고속으로 갈수록 저항감소 현상을 보이고 있다.

또한, Fig. 5.30의 유효마력(EHP)비교 곡선에서는  $Fn_{\nabla}=3.0\sim 5.5$ 사이에서는 선미 보조동체 장착선형이 가지지 않는 선형에 비해 약 1.7~5.0% 정도의 소요마력 증가율을 보이다가, 설계선속 45knot ( $Fn_{\nabla}=6.2$ )를 기점으로 고속으로 갈수록 소요마력 감소율이 계속되다가 선속 52knot(약  $Fn_{\nabla}=7.2$ )부근에서는 약 11% 정도의 소요마력 감소율을 나타내고 있다.

이는, 대상선의 실선속력  $Fn_{\nabla}=3.0\sim 5.5$ 에서는 선미 보조동체장착에 따른 침수표면적 증가로 전 저항과 소요마력의 증가를 보이지만, 약  $Fn_{\nabla}=6.2$  이상의 고속 활주 주행상태에서는 횡동요 감소를 위해 장착한 선미 보조동체가 오히려 최적의 주행 트림각을 유지시켜 줌으로써 접수면(침수표면적) 감소에 따른 전체저항을 감소시킨 것으로 판단된다.

Fig. 5.31~5.35의 계측시간(time history)에 따른 횡동요(roll)비교 곡선에서 선미 보조동체 장착선형이 각 시험선속에서 횡동요 각(roll angle)이 현저하게 감소하는 현상을 보이고 있어 선미 보조동체 장착 선형이 횡동요 운동특성이 매우 우수한 선형임을 확인하였다. 또한, Fig. 5.36~5.40의 종동요(pitch) 시험결과에서도 각 시험선속에서 선미 보조동체 장착선형이 약 5°의 종동요(pitch)운동응답 특성을 보였지만, 선미 보조동체를 가지지 않는선형은 대략 10°이상의 종동요(pitch) 운동응답 특성을 보이고 있어 선미 보조동체 장착

선형이 우수한 종동요 저감 운동응답 특성을 가지는 선형임을 검증하였다.

이는, 고속 stepped hull 활주형선은 고속 주행시 선미로 갈수록 선미끝단의 좌우 접수면이 소실되어 그에 따른 횡동요 및 종동요 운동응답이 저하되지만, 선미 보조동체 선형은 고속에서 불안정한 기존 stepped Hull 선형을 안정적으로 구현할 수 있도록 선미 양현측에 M-hull 타입을 기본형상을 유지시켜 주고 선측으로 파생되는 조파들을 선미에서 효과적으로 감쇠시켜 후미의 파고를 현저하게 낮추어 줌으로써 우수한 성능의 횡동요와 종동요 운동응답 특성을 나타내는 것으로 사료된다.

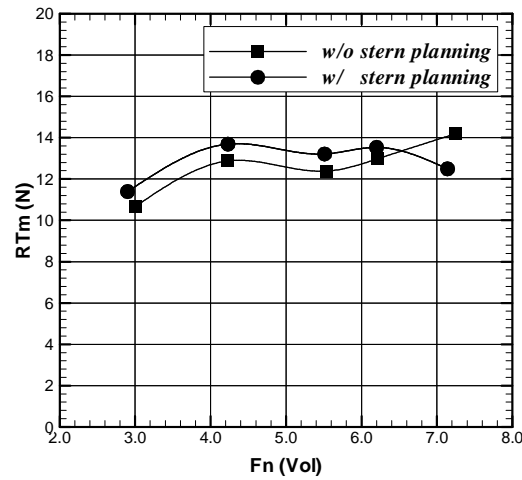


Fig. 5.27 Comparison of RTm for model ships

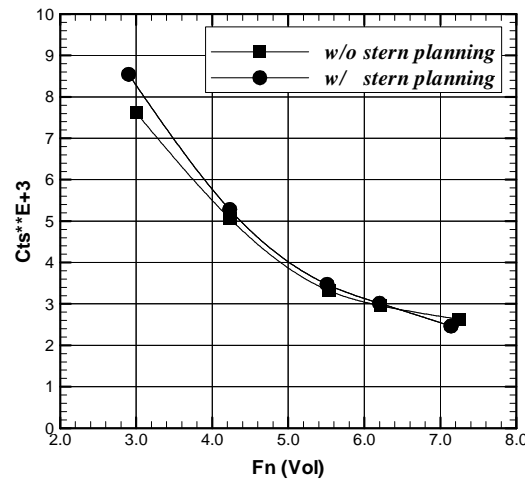


Fig. 5.28 Comparison of Cts for ships (Fn▽)

### 5.3 선저 공기공급 활주형선의 저항특성 비교

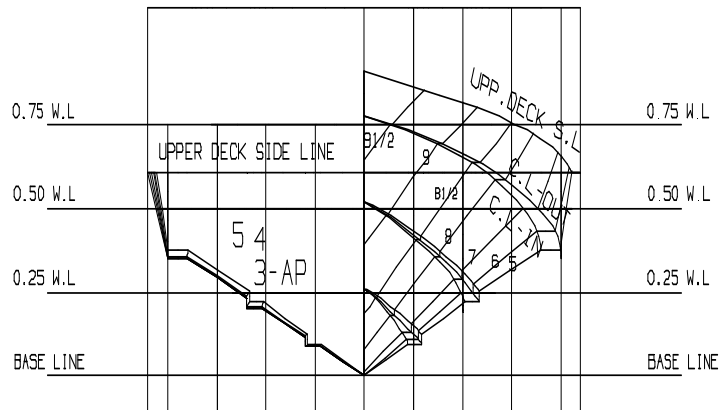
본 절에서는 선저 공기공급에 따른 저항감소형 고속 활주형선 선형개발을 위하여 선저 공기공급 선형(w/ air injection hull)과 공기공급이 없는(w/o air injection hull) 2척의 동일선형을 대상으로 실험역 모형시험기법을 이용하여 저항특성을 비교, 평가하였다.

#### 5.3.1 대상모형

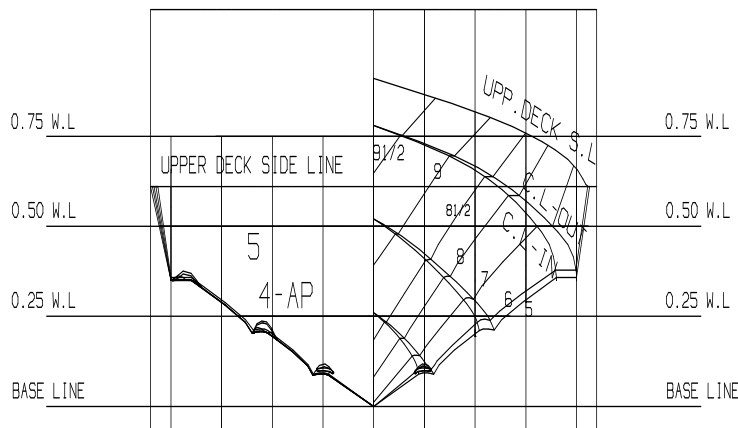
선저 공기공급 유무에 따른 고속 활주형 레저보트 선형의 실선 대응 모형선의 축척비(scale ratio)는 1/8.025 비율로 하였으며, 모형선 재질은 해상시험 조건인 모형선 배수량, 흘수 등의 변화를 고려하여 FRP와 목재로서 가볍게 제작하였다. 선저 공기공급 선형과 공기공급이 없는 선형의 주요제원을 Table 5.5에 정리하였고, 정면선도를 Fig. 5.48 ~ 5.49에, 시험에 사용된 선저 공기공급 유무 모형선의 형상을 Fig. 5.50에 나타내었다.

**Table 5.5 Principal particulars of ship and model**

Items	Air injection hull (w/o)		Air injection hull (w/ )	
	Ship	Model	Ship	Model
Lbp (m)	9.630	1.200	9.630	1.200
Lwl (m)	8.921	1.112	8.921	1.112
B (m)	2.200	0.274	2.200	0.274
Bwl (m)	2.115	0.264	2.115	0.264
d(m)	0.500	0.0623	0.500	0.0623
S (m <sup>2</sup> )	20.024	0.3109	19.610	0.3045
▽ (m <sup>3</sup> )	4.39	0.00849	4.38	0.00848
△ (ton)	4.495	0.0087	4.492	0.0087
LCB(%aft)	3.6508 (59.2%)		3.677 (59.3%)	
LCF(%aft)	4.0193 (55.1%)		4.098 (54.7%)	



**Fig. 5.48** *Body plan of planing craft without air injection*



**Fig. 5.49** *Body plan of planing craft with air injection*

### 5.3.2 시험결과 고찰

시험방법은 5.1절, 5.2절과 동일하며 본 시험선에는 선저 공기공급을 위하여 모형선 선체 좌·우현 상부 공기흡입부에서 호스를 이용하여 선저부분까지 연결하였다. Fig. 5.54 ~ 5.57에 선저 공기공급 유무 고속 활주형선의 실험역 모형시험 모습을 보였다.

모형선의 저항계측치( $R_t$ )와 전 저항계수( $C_t$ )곡선은 Fig. 5.51 ~ Fig. 5.52와 같이 선저 공기공급 선형이 없는 선형에 비해 시험선속에서 감소되는 경향을

보이고 있으며, 선속이 증가할수록 저항 감소율은 점점 작아지는 경향을 보이고 있다. 또한, Fig. 5.53의 유효마력(EHP) 비교곡선에서도 약  $F_n \nabla = 1.4 \sim 1.5$  부근에서는 선저 공기공급 선형이 없는 선형에 비해 약 27.0% 정도의 소요마력 감소율을 보이다가, 선속 10knot ~ 20knot에서는 평균 20%의 저항감소율을 선속 25knot ~ 40knot에서는 평균 4.5%의 저항감소율을 보이고 있다.

이는 선저 공기공급의 영향으로 선저 표면장력이 선저표면과 물 사이의 부착력을 약화시킬 수 있도록 난류응력이 감소하는 방향으로 선저표면 특성을 변화시켜 마찰저항을 감소시키는 원인이 된 것으로 사료된다.

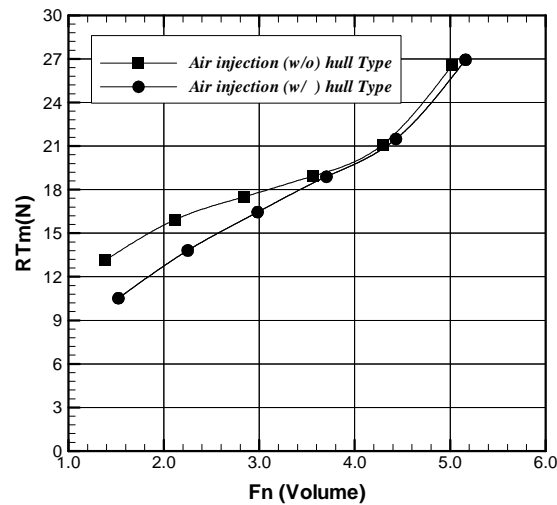


Fig. 5.51 Comparison of RTm for model ships

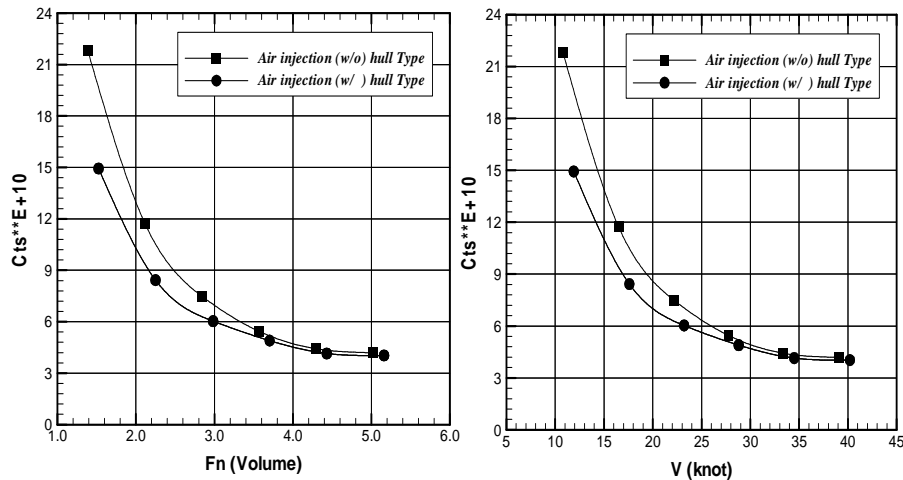


Fig. 5.52 Comparison of Cts for ships

## 제 6 장 결 론

본 논문에서는 고속 활주형선의 초기 설계단계에서 주요성능을 정성적으로 평가할 수 있는 모형시험기법의 하나로서 모형선의 실제 주행상태를 직접 실현하여 실선성능을 확인할 수 있는 실험역 모형시험기법을 정립하였다. 그리고, 본 시험법을 이용하여 최근 관심이 집중되고 있는 고속 활주형선 레저보트 3척을 대상으로 선저 step개수별, 선미 보조동체 장착, 선저 공기공급 유무 등의 활주형선 선형개량에 따른 주요성능을 정성적으로 비교, 평가하였다.

이상의 연구를 통하여 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 고속 활주형선의 선형시험은 국내의 회류수조 유속 및 예인전차의 속도 제한과 수조 천수영향, 측벽효과 등의 여러 가지 문제가 작용하고 있다. 하지만, 본 연구에서 정립한 실험역 모형시험기법은 고속 활주형선의 건조 이전 초기 설계단계에서 부가물 장착 또는 선저 형상개선에 따른 주요성능의 정성적인 비교, 평가에 용이하게 이용될 수 있을 것이다.

(2) 고속 활주형선 레저보트의 선저 스텝개수에 따른 저항특성은  $Fn_{\nabla}=0.75$  미만의 저속구간에서는 스텝에 따른 형상저항의 증가로 single, twin-step이 non-step선형에 비해서 저항증가를 보였다. 하지만,  $Fn_{\nabla}=3.0$ 의 이상의 고속 영역에서는 스텝선형이 non-step선형에 비해서 선저 양력발생에 따른 고속 활주 주행상태에서 최적의 트림 각을 유지시켜 주고, twin-step선형이 single-step선형에 비해 선저 공기유입에 따른 선저 접수면(침수표면적) 감소 효과를 조금 더 발생시켜 twin-step선형이 non-step선형에 비해서는 평균 7.5%, single-step선형에 비해서는 평균 4.0%의 저항감소 효과의 증진에 기여함을 확인할 수 있었다.

(3) 고속 활주형선 레저보트의 선미 보조동체 장착 유무에 따른 저항특성은 선미 보조동체 장착 선형(w/ stern planing body)이 가지지 않은 선형(w/o stern planing body)에 비해 시험구간  $Fn_{\nabla}=3.0 \sim 6.0$ 사이에서는 선미 보조동체장착에 따른 침수표면적 증가로 약 1.7~5.0% 정도의 저항증가율을 보인다

가, 설계선속 45knot( $F_n \nabla = 6.2$ )이상의 고속으로 갈수록 선측으로 파생되는 조파들을 선미에서 효과적으로 감쇠시켜 후미의 파고를 현저하게 낮추어 줌으로써 활주를 위한 최적의 주행 트림각을 유지시켜  $F_n \nabla = 7.2$ 부근에서는 약 10% 정도의 저항감소 효과가 나타남을 확인하였다.

(4) 선미 보조동체 장착 유무에 따른 stepped hull 활주형선 레저보트의 횡동요(roll)시험결과 선미 보조동체 장착선형이 가지지 않은 선형에 비해 각 시험선속에서 횡동요 각(roll angle)이 현저하게 작아짐을 확인하였다. 또한, 종동요(pitch)계측결과도 선미 보조동체 장착선형은 약 5°, 선미 보조동체를 가지지 않는 선형은 대략 10°이상의 종동요(pitch angle)각을 보였다. 이는, 고속 스텝 활주형선의 선미 보조동체는 고속에서 불안정한 스텝선형을 선미 양현측에 M-hull 타입의 기본형상을 유지시키고 선저부분을 삼각형상의 접수면으로 구현시켜줌으로서 우수한 성능의 횡동요와 종동요 운동응답 특성을 가지는 것으로 사료된다. 따라서 스텝을 가지는 활주형선의 선미 보조동체 장착은 횡동요·종동요 운동성능 향상을 위한 효과적인 수단이 될 수 있을 것으로 판단된다.

(5) 선저 공기공급 유무에 따른 고속 활주형선 레저보트의 저항특성은 시험범위  $F_n \nabla = 1.5 \sim 5.0$ 에서 선저 공기공급 선형이 공기공급의 영향으로 선저 표면장력이 선저표면과 물 사이의 부착력을 약화시킬 수 있도록 난류용력이 감소하는 방향으로 선저표면 특성을 변화시켜 마찰저항을 감소시켜 공기공급이 없는 선형에 비해 약 5%~20%의 저항감소 효과가 나타남을 실험적으로 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제안한 실험역 모형시험기법은 향후, 고속 활주형선의 기본적인 유체역학적인 현상이 되는 고속 항주시 자세변화에 기인하는 트림, 침하량도 동시에 계측할 수 있는 시험방법이 보완되어져야 할 것이다. 또한, 모형시험 결과로부터 활주형선의 침수표면적을 결정할 수 있는 시험법을 정립하여 실선 성능을 추정하는데 있어 정성적인 평가뿐만 아니라, 정량적인 시험결과 해석 연구 등도 함께 수행되어져야 할 것으로 사료된다.



## 참 고 문 헌

- [1] Clement, E.P, “Resistance Tests of a Systematic of Planing Hull Forms, T, SNAME, Vol.71, 1963, p.491–579.
- [2] Tanaka, H., “Methodology of Reseach and Development of High–Speed Marine Craft” , 高速艇の性能 Symposium, Journal the Society of Naval Architects, Japan, 1989.
- [3] Savitsky, D., “Hydrodynamic Design of Planing Hulls” , Marine Technology, 1964, p.71–95.
- [4] Hayashita, S. et al., “Resistance Tests of High–Speed Crafts by Attitude Control Method(Part 4)” , Journal the West–japan Society of Naval Architects, Japan, No.105, 2003.
- [5] Katayama, T. et al., “Characteristics of Motion for Planing Craft in Head Wave at Very High–Speed” , Journal the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No.233, 2000.
- [6] Ikeda, Y. et al., “Measurements of Hydrodynamic Forces Acting on Planing Hulls in Oblique Towing Condition” , Journal the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No.231, 1999.
- [7] Report of the High–Speed Marine Vehicle Committee, Proceedings of the 18th ITTC, HSMVC, 1988.
- [8] Report of the High–Speed Marine Vehicle Committee, Proceedings of the 18th ITTC, pp.289–375, 1990.
- [9] Hayashita, S. et al., “A Study on Frictional Resistance of Planing Craft” , Journal the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No.235, 2001.

- [10] Savitsky, D. et al., “Status of Hydrodynamic Technology as Related to Model of High Speed Marine Vehicles” , DTNSRDC- 81/026, 1981.
- [11] Kawahara, U. et al., “Resistance Test Method for High-Speed by Using a Trim Fixed Type of Dynamometer” , Journal of the Society of Naval Architects Japan, No.220, 1993.
- [12] Ikeda, Y. et al., “An Experimental Method to Evaluate Resistance and Attitudes of Planing Craft Using Very Small Models” , Journal the Society of Naval Architects, Japan, No.191, 2002.
- [13] Savitsky, D. et al., “Wetted Area and Center of Pressure of Planing Surfaces at Very Low Speed Coefficients” , Stevens Institute of Technology, Davidson Laboratory Report No.493, 1954.
- [14] Ohkusu, M., "Advances in Marine Hydrodynamics", Advances in Fluid Mechanics, Vol. 5, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, pp.8 ~ 14, 1996.
- [15] Maruo, H., “Hydrodynamics of High-Speed Marine Craft (I)” , 高 速艇 の性能, 1989.
- [16] Model Tests of High-Speed Marine Vehicle Specialist Committee, Proceedings of the 22nd ITTC, 1999.
- [17] 原羽誠一., “滑走” , 高速艇工學, 丹艇協會出版部, 971/2001.
- [18] 민계식, 이귀주, “활주형선의 단면형상 및 장-폭비와 저항특성과의 관계의 실험적 연구,” 대한조선학회지, 제31권 제3호, pp.64 -68. 1994.

- [19] 박명규, 신영균, 신영식, “활주형선의 선형설계와 유체동력학적 특성 고찰”, 해사산업연구소논문집, 제9호, 1999.
- [20] 山口眞格, “滑走艇の模型試験解析”, 日本運輸省 船舶技術研究所 報告會, 1994.
- [21] Mori, K., Drag Characteristic of High-Speed Small Boat”, Journal the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No.230, 1998.
- [22] 정석호, “모형시험과 수치해석을 이용한 고속 활주선의 선형개발과 저항특성에 관한 연구”, 부산대학교 박사학위논문, 2004.
- [23] Suzuki, K. et al., “Development of Resistance Test for High-Speed Planing Craft Using Very Small Models”, Journal the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No.238, 2002.
- [24] 제병렬 외 2인, “고속정의 선형 특성에 관한 연구”, 대한조선학회 추계논문발표회, 1999.
- [25] 박충환 외 “활주형선의 Spray strip 부착에 따른 저항특성 연구”, 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 132 ~ 136, 2004.
- [26] 이춘주, 반석호 등, “반활주형 선형의 저항특성 연구”, 대한추계조선학회, pp.211-215. 2003.
- [27] Tanaka, H. et al., “Cooperative Resistance Tests with Geosim Models of a High-Speed Semi-Displacements Craft”, Vol.169, 1991, PP.55-64.
- [28] Techno Marine, “新概念水曹試験(高速艇,滑走艇)”, 1995.
- [29] 박충환 등, “G/T 3.5톤급 레저보트의 선저 공기공급 유무에 따른 저항특성 비교연구”, 한국항해항만학회 춘계학술대회, pp. 37 ~ 39, 2006.

- [30] 이승희, “선박의 저항저감 기술동향”, 해외첨단기술동향조사사업 보고서, 인학대학교-과학기술부, 2000.
- [31] 장진호, 김효철, “선저에 부착된 공기공동에 의한 선박의 저항감소에 관한 연구”, 대한조선학회 논문집, Vol.36, No. 2, pp. 1 ~ 8, 1999.
- [32] Clement, E.P, “Graphs for Predicting the Ideal High Speed Resistance of Planing Catamarans”, DTNSRDC, Report No. 1961.
- [33] Comstock, J.P. and Hancock, C.H., “The Effect of Size of Towing Tank on Model Resistan”, SNAME Transactions, Vol. 50, 1942.
- [34] 박충환 등, “7m급 고속 구난정의 Step 개수에 따른 저항특성 비교 연구”, 한국항해항만학회 춘계학술대회논문집, 제31권 제1호, pp. 41 ~ 43, 2007.
- [35] Froude, W., “Experiments on Surface Friction”, British Association Reports, 1872, 1874.
- [36] 반석호, 김상현, “해양레저용 보급형 모터보트 설계에 관한 연구”, 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 115 ~ 118, 2002.
- [37] Gadd, G.E and Hogben, N., “An Appraisal of the Shio Resistance Problem in the Light of Measurements of the Wave Pattern”, NPL Ship Division Report No. 36.
- [38] Savitsky, D. et al., "Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water", Marine Technology, SNAME, Paramus, NJ, 1976.
- [39] Joseph G. et al., “Performance Prediction, Small Craft Engineering Resistance, Propulsion and Seakeeping”, No. 120, 1975.